

海杂波背景中的一种恒虚警率检测方法*

杜鹏飞^{1,2},王永良²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073; 2. 空军雷达学院,湖北 武汉 430019)

摘要 提出了一种适用于机载预警(AEW)雷达海杂波背景中目标检测的双参数有序统计恒虚警(CFAR)处理方法——BOS-CFAR方法,并对该方法在非高斯海杂波背景、多脉冲非相参积累和多目标干扰环境下的检测性能进行了讨论和分析。理论分析和仿真结果表明,该方法能有效地提高 AEW 雷达海杂波背景中的 CFAR 检测性能。

关键词 :AEW 雷达 ;CFAR ;海杂波 ;多目标

中图分类号 :TP959.73 **文献标识码** :A

A CFAR Detection Method in the Sea Clutter

DU Peng-fei^{1,2}, WANG Yong-liang²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Wuhan Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract :A novel biparametric OS-CFAR (BOS-CFAR) detection method for AEW radar in the sea clutter is proposed. The performance is discussed and analyzed for multiple-pulse noncoherent integration when this method operates in the multiple-target environment in the non-Gaussian sea clutter background. Theoretical analysis and simulation result show that the proposed method can enhance the CFAR detection performance for AEW radar in the sea clutter background effectively.

Key words :AEW radar ; CFAR ; sea clutter ; multiple-target

迄今为止,关于机载预警雷达(AEW Radar)CFAR检测方面的文章公开发表的比较少,在已公开发表的文章中,大都采用单元平均(CA-CFAR)技术。该方法实现简单,在均匀瑞利杂波背景下的检测性能最佳,然而在多目标环境和杂波边缘环境下的检测性能却严重下降。与地杂波不同,海杂波的均匀性较好,所以,当 AEW 雷达在空/海方式下进行 CFAR 检测时,主要考虑海杂波的非高斯性和多目标的影响,而不考虑杂波边缘的影响,其 CFAR 检测技术必须确保预警机能够同时发现几十、甚至上百个目标。虽然许多文献都谈到了对付多目标干扰的方法,但这些方法大都脱离具体的应用背景,且条件过于理想,有的只考虑高斯杂波背景,有的只考虑单脉冲检测,而没有综合考虑非高斯杂波背景和多脉冲积累下的 CFAR 检测,距实际情况相差甚远。虽然文献[3]讨论了 Weibull 杂波背景下的非相参积累,但该文讨论的是对大量脉冲进行积累,满足中心极限定理,积累以后的杂波近似为高斯分布。然而在某些情况下,如宽带信号或快速运动的目标,由于脉冲间目标回波的距离走动使回波在距离单元上错开,而难以实现大量脉冲的非相参积累。

本文结合具体的雷达体制和工作环境,充分考虑了海杂波的非高斯性和 AEW 雷达的多目标检测能力,提出了一种 AEW 雷达海杂波背景下的 CFAR 检测方法,并对该方法在非高斯海杂波背景、少量脉冲非相参积累和多目标干扰环境下的 CFAR 检测性能进行了讨论和分析。

1 BOS-CFAR 检测方法及其性能

当 AEW 雷达工作在空/海方式时,由于海杂波相对较弱,加之海面目标的运动速度较低,其回波多

* 收稿日期:2004-12-25

基金项目:高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(TRAPOYT)资助

作者简介:杜鹏飞(1974—)男,博士生。

普勒频率接近于海面杂波,因而此时的 AEW 雷达宜采用普通低重频脉冲体制,其 CFAR 检测在时域上进行。同时,由于海杂波的相关性较强,所以就用频率捷变使海杂波去相关。去相关后的海杂波,其统计特性和噪声类似,通过积累就可以提高信噪比。

1.1 预警机雷达空/海方式下 CFAR 检测的特点及难点

1. 考虑多目标干扰的影响

与地杂波不同,海杂波的均匀性很好,所以,当 AEW 雷达在海杂波背景下进行 CFAR 检测时,主要考虑多目标的影响,而不考虑杂波边缘的影响,其 CFAR 检测技术不但必须确保能够同时发现几十、甚至上百个目标,而且要能剔除分立强杂波(如油井、铁塔)的干扰。

2. 考虑海杂波的非高斯性

大量的实验和研究表明,海杂波的概率密度函数往往会偏离瑞利分布,而出现长的拖尾现象,表现出很强的非瑞利性。非瑞利杂波背景不同于瑞利杂波背景,它具有两个参数,分别为尺度参数和形状参数,而且在实际杂波环境中,这两个参数经常是未知的。以往基于瑞利假设的单参数 CFAR 算法此时将不能保持恒虚警,因此必须抛弃单参数 CFAR 方法,而采用双参数 CFAR 检测技术。

1.2 CA-CFAR 检测方法评述

CA-CFAR 方法由于有结构简单和实现方便等优点,因而被广泛采用,包括现役 AEW 雷达在内。该方法利用与检测单元邻近的参考单元的均值来估计检测单元背景杂波功率水平,以确定检测阈值。CA-CFAR 检测技术在均匀瑞利杂波背景下的检测性能最佳,然而在多目标环境中的检测性能却严重下降。在检测某个目标时,参考单元中的其它目标就是干扰目标,干扰目标的存在会抬高判断门限,降低主目标的检测概率,最终造成雷达作用距离缩短和目标丢失。

1.3 BOS-CFAR 方法的导出及其性能

H. Rholing 于 1983 年提出了 OS-CFAR(有序统计)方法^[5],该方法具有较强的抗干扰目标的能力,同时在均匀杂波背景中的性能下降也是适度的、可以接受的。

不失一般性,用 Weibull 分布来模拟海杂波。Weibull 分布有两个参数,分别为尺度参数和形状参数,而且在实际杂波环境中,这两个参数经常是未知的,所以需要估计这两个参数。文献[6]提出了一种经典的双参数 CFAR 方法,虽然该方法能保持恒虚警,但由于其 CFAR 损失要远远大于单参数 CFAR 方法,这样大的检测损失一般是难以接受的。为了能基本保持虚警概率恒定又能获得较高的检测概率,对形状参数的估计必须使用一种好的估计方法。本文提出了一种新的双参数有序统计恒虚警(BOS-CFAR)方法,该方法利用一阶矩和二阶矩估计形状参数,它不仅适合于 Weibull 分布中的形状参数的估计,同时也适合于 K 分布等其它分布的形状参数的估计。本文考虑了多脉冲非相参积累的情况。BOS-CFAR 方法的框图如图 1 所示。

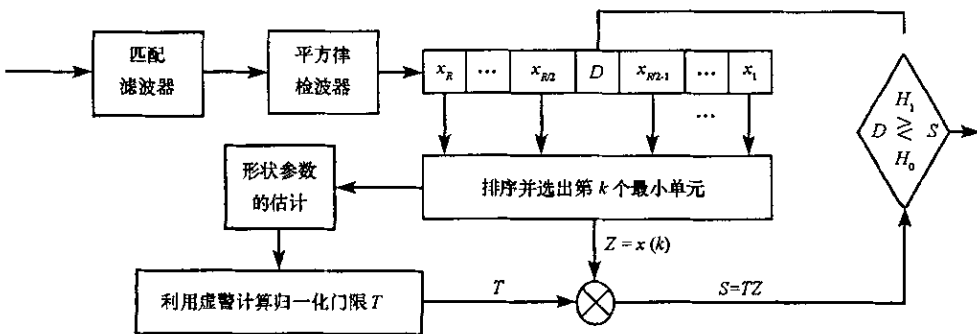


图 1 BOS-CFAR 检测器框图

Fig. 1 The structure of BOS-CFAR detector

BOS-CFAR 方法的思路如下:

Weibull 分布的概率密度函数为:

$$f(x) = bcx^{c-1} \exp(-bx^c), \quad x \geq 0 \quad (1)$$

其 n 阶矩为:

$$E\{x^n\} = b^{-n/c} \Gamma(n/c + 1), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

其中, b 和 c 分别表示 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。形状参数 c 表明分布的拖尾现象, c 越小, 表明拖尾现象越严重, 杂波越尖锐。由于

$$\frac{E^2\{x\}}{E\{x^2\}} = \frac{b^{-2/c} \Gamma^2(1/c + 1)}{b^{-2/c} \Gamma(2/c + 1)} = \frac{\Gamma^2(1/c + 1)}{\Gamma(2/c + 1)} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, Weibull 分布的一阶矩的平方与二阶矩的比值中与尺度参数无关, 因而可以首先从参考单元采样中分别估算出一阶矩的平方与二阶矩 $\hat{E}^2\{x\}$ 和 $\hat{E}\{x^2\}$ 。由于

$$\frac{\hat{E}^2\{x\}}{\hat{E}\{x^2\}} = \frac{\Gamma^2(1/\hat{c} + 1)}{\Gamma(2/\hat{c} + 1)} \quad (4)$$

从式(4)可以解出形状参数 c 的估计值 \hat{c} 。当得到 \hat{c} 后, 再将 \hat{c} 代入虚警概率的表达式即可得到归一化门限。Weibull 分布经过多脉冲积累后的虚警概率 P_{fa} 的表达式为^[4]:

$$P_{fa} = \frac{\exp\{-\Gamma^c[1 + (2/c)]T^{c/2}\}}{(-1)^M c \Gamma(M)} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^m \frac{1}{m} \binom{m}{k} \frac{\chi - 1}{\Gamma(kc/2 + 1 - M)} \sum_{l=0}^{m-1} \frac{T^{c/2} \Gamma^{c/2}(1 + 2/c)}{l!} \quad (5)$$

式中, c 为 Weibull 分布的形状参数, M 为脉冲积累的个数, T 为归一化门限。特别地, 当 $c = 2$ (此时 Weibull 分布就变为 Rayleigh 分布); $M = 1$ (表示单脉冲) 时, 式(5)就变为 $P_{fa} = \exp(-T)$ 。得到归一化门限 T 后, 再进行相应的 CFAR 处理。对参量型 CFAR 来说, 各种 CFAR 方法的差别就在于对背景杂波功率水平的估计所使用的方法不同而已。

2 仿真结果分析

我们对 CA-CFAR 方法和 BOS-CFAR 方法在各种形状参数、不同的脉冲积累个数、不同的参考单元数、不同的干扰目标数等情况下的检测性能进行了分析和比较, 由于篇幅的关系, 只给出部分性能分析仿真结果。实验中, 虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$, 参考单元数 $N = 32$, 脉冲积累个数 $M = 3$, Weibull 分布的形状参数 $c = 1.8$, 参考单元中的干扰目标数分别为 $IN = 0, 1, 2, 3$ (考虑到一个距离门内的目标数不可能太多), ISR 为干扰信号功率比, 本文取 $ISR = 0\text{dB}$ (对应机群或飞行编队这类情况), 杂波功率水平的估值均取排序后的第 k 个采样值, 此处 $k = 3N/4$ ^[5]。

图2为 BOS-CFAR 处理器和 CA-CFAR 处理器在 $c = 1.8$, $ISR = 0\text{dB}$ 时的检测性能比较。四个图分别对应干扰目标数 $IN = 1, 2, 3, 4$ 时的情况。从图 $\chi(a)$ 中可以看出, 当参考单元中出现一个干扰目标时, 在信杂比的高端, 两条曲线几乎重合, 而在信杂比的低端, CA-CFAR 处理器的检测性能还略好于 BOS-CFAR, 这是由于此处取的参考窗长度较大, 而干扰目标只有一个, 此时利用 CA-CFAR 处理器就减小了干扰目标在杂波功率水平估计中的比重。从图 $\chi(b)$ 中可以看出, 当参考单元中出现两个干扰目标时, 且检测概率为 80% 时, CA-CFAR 方法相对于 BOS-CFAR 方法大约有 2.5dB 的 CFAR 损失, 随着检测概率的增大, 该损失相应增大。图 $\chi(c)$ 说明, 当 $IN = 3$, $P_d = 80\%$ 时, CA-CFAR 处理器相对于 BOS-CFAR 处理器大约有 7dB 的 CFAR 损失。图 $\chi(d)$ 说明, 当参考单元中有四个干扰目标时, CA-CFAR 处理器的检测性能大大下降, 此时, CA-CFAR 方法基本失效, 而 BOS-CFAR 方法仍有比较好的检测性能。这足以验证了 BOS-CFAR 处理器具有很强的抗干扰目标的能力。

3 结束语

本文给出了一种非高斯分布中形状参数的估计方法, 提出了 BOS-CFAR 方法, 并对该方法在非高斯海杂波背景、多脉冲非相参积累和多目标干扰环境下的检测性能进行了分析和讨论。理论分析和仿真结果表明, 该方法较传统的 CA-CFAR 方法更能有效地解决 AEW 雷达海杂波背景中的多目标干扰问题。同时, 该方法结构简单, 易于工程实现。

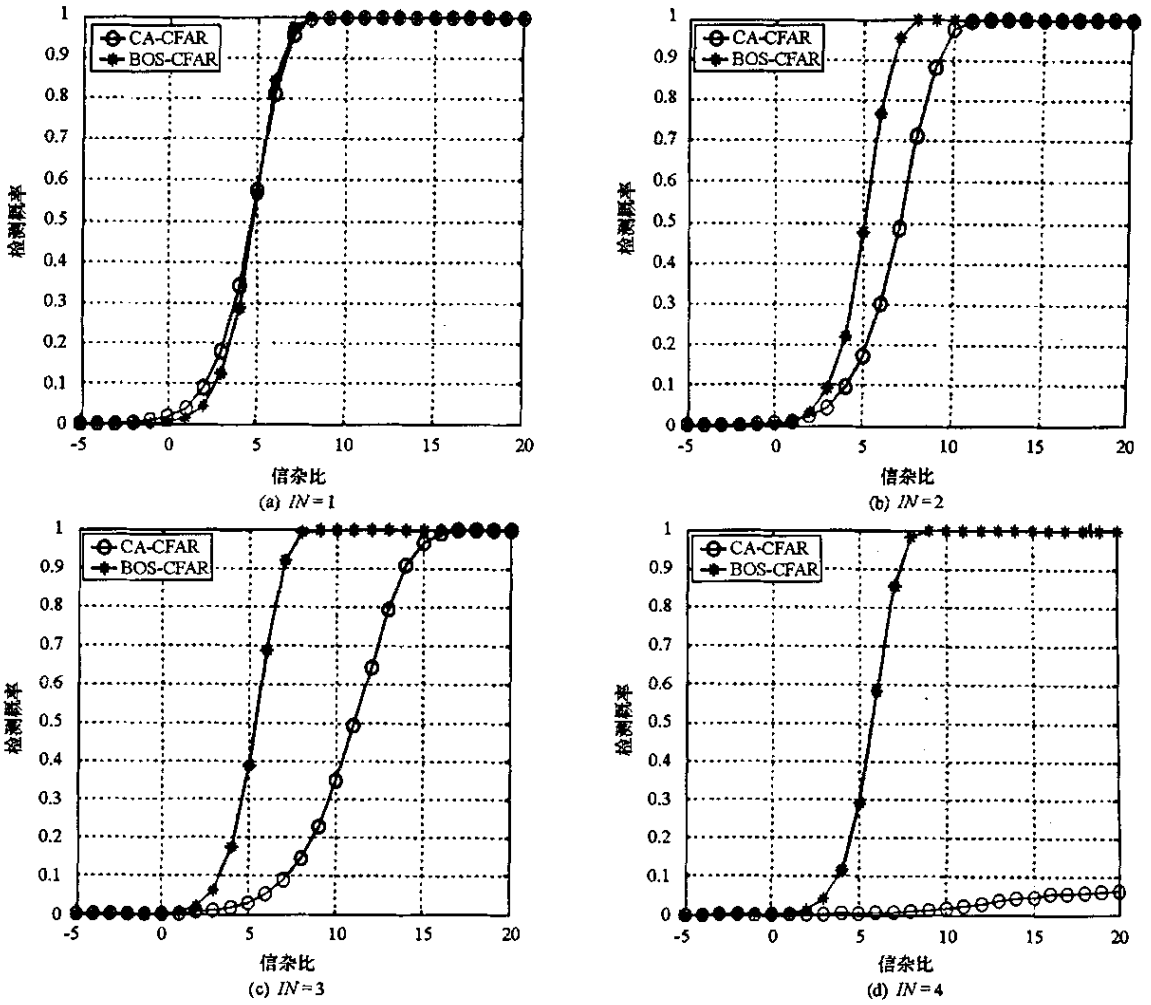


图2 BOS-CFAR 和 CA-CFAR 处理器的检测性能比较 ($c = 1.8, ISR = 0\text{dB}$)

Fig.2 Comparison of detection performance between BOS-CFAR and CA-CFAR ($c = 1.8, ISR = 0\text{dB}$)

参考文献:

[1] 王永良,彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
 [2] 何友,等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
 [3] Meng H D, Wang X Q, Peng Y N. New CFAR Processor Independent of Original Noise Distribution[A]. 2001 CIE Int. Conf. on Radar[C], Beijing, 2001 368-371.
 [4] Conte E, Ricci R. Performance Prediction in Compound-Gaussian Clutter[J]. IEEE Trans. on AES, 1994, 30(2):611-616.
 [5] Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situation[J]. IEEE Trans. on AES, 1983, 19(4):608-621.
 [6] Weber P, Haykin S. Order Statistics CFAR Processing for Two-parameter Distributions with Variable Skewness[J]. IEEE Trans. on AES, 1985, 21(6):819-821.

