

OSGO-和 OSSO-CFAR 在 K 分布杂波背景下的性能分析

郝程鹏^{***} 侯朝焕^{*} 鄢 锦^{*} 原建平^{*}

^{*}(中国科学院声学研究所 北京 100080)

^{**}(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文证明了形状因子已知条件下 OSGO-CFAR 和 OSSO-CFAR 检测器在均匀统计独立的 K 分布杂波背景下具有恒虚警性能, 分析了两种检测器在均匀杂波背景、杂波边缘和存在强干扰目标情况下的检测性能。并与 OS-CFAR 进行了比较, 结果表明 OSGO-CFAR 在均匀杂波背景和存在强干扰目标情况下带来的附加检测损失很小, 在杂波边缘具有更好的虚警控制能力。所以, OSGO-CFAR 是 K 分布杂波背景下一种性能比较好的恒虚警检测器。

关键词: K 分布杂波, 恒虚警, 检测损失

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)07-1061-04

Performance Analysis of OSGO- and OSSO-CFAR in K-Distribution Clutter

Hao Cheng-peng^{***} Hou Chao-huan^{*} Yan Jin^{*} Yuan Jian-ping^{*}

^{*}(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract This paper proves that Ordered Statistic with Greatest Option CFAR(OSGO-CFAR) and Ordered Statistic with Smallest Option CFAR(OSSO-CFAR) are also of CFAR under homeomorphic independent K-distributed clutter background when the shape parameter is known. The performance of two detectors is analyzed against uniform clutter background, clutter edges and multiple target environments. Compared to OS-CFAR, OSGO-CFAR has little additional detectability loss against uniform clutter background and multiple target environments, and it has improved control ability of false alarm against clutter edges. Therefore, OSGO-CFAR detector is a kind of CFAR detector which has better performance during K-distributed clutter.

Key words K-distributed clutter, Constant False Alarm Rate(CFAR), Detectability loss

1 引言

雷达信号恒虚警处理的基本原理就是根据检测单元附近的参考单元估计背景杂波的平均功率, 并以此调整门限, 从而使雷达信号检测满足奈曼-皮尔逊准则。雷达所处的杂波环境是很复杂的, 所以恒虚警处理的方法也很多。近些年来对雷达杂波的研究结果表明, K 分布是最为有效地描述现代高分辨率雷达杂波分布的模型, 瑞利分布只是其中的一种特殊情况, 所以研究 K 分布杂波背景下的 CFAR 检测意义很大^[1]。文献[2]研究了有序统计(OS)CFAR 检测器在 K 分布杂波中的检测性能, 这种检测器具有较好的对抗多目标的能力, 但是在杂波边缘环境中性能不佳, 并且处理时间也比较长, 本文的目的就是寻找一种能够克服这些缺点并具有 OS-CFAR 检

测器在多目标环境中优点的恒虚警检测器。

2 K 分布杂波背景下 OSGO-CFAR 和 OSSO-CFAR 检测器

如果随机变量 x 服从 K 分布, 其概率密度函数(PDF)^[2]:

$$f(x) = \frac{2c}{\Gamma(v)} \left(\frac{cx}{2} \right)^v K_{v-1}(cx) \quad (1)$$

其中, v 为形状因子, 决定杂波的尖锐程度, 对于高分辨率海杂波, $0.1 < v \leq \infty$, c 为尺度因子, 它越大表明杂波强度越小, 杂波的平均功率 $\mu = 4v/c^2$, $\Gamma(\bullet)$ 为 Gamma 函数, $K_{v-1}(\bullet)$ 为 $v-1$ 阶第二类修正 Bessel 函数。由 Bessel 函数的性质可得 x 的分布函数(CDF)为

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \int_0^x f(x)dx = \int_0^x \frac{2c}{\Gamma(v)} \left(\frac{cx}{2}\right)^v K_{v-1}(cx) dx \\
 &= \int_0^x \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{X}{2}\right)^v K_{v-1}(X) dX \\
 &= -\frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{X}{2}\right)^v K_v(X) \Big|_0^x = 1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{cx}{2}\right)^v K_v(cx) \quad (2)
 \end{aligned}$$

有序统计最大选择(OSGO)CFAR 和有序统计最小选择(OSSO)CFAR 检测器的原理图^[3]如图1所示。其中, D 为检测单元, 两侧为参考单元, 也称作参考滑窗, 前沿、后沿参考滑窗的长度均为 $M/2$, 杂波功率水平估计由参考滑窗得到。OSGO-CFAR 分别将前沿、后沿参考滑窗的 $M/2$ 个参考单元排序, 得到排序后的第 k 个最小单元值 X 和 Y , 然后再取 X, Y 中大的作为杂波功率水平估计 Z 。OSSO-CFAR 则是取 X, Y 中小的作为杂波功率水平估计 Z 。 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。 Z 对杂波功率水平的估计在杂波强度变化时具有自适应性, 所以判决准则是, $D \geq Tz$ 其中 H_1 表示目标, H_0 表示目标不存在。

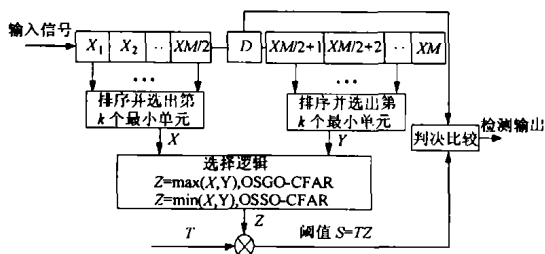


图1 OSGO-CFAR, OSSO-CFAR 检测器原理框图

在无目标的假设条件下, 如果背景杂波服从 K 分布, 即 $D, X_1, \dots, X_M$ 服从 K 分布, 其概率密度函数和分布函数分别由式(1)和式(2)给出。均匀背景情况下从 $M/2$ 个总体样本中选取第 k 个样本的 PDF^[4]:

$$f_k(x) = k \binom{M/2}{k} F^{k-1}(x) f(x) [1 - F(x)]^{M/2-k} \quad (3)$$

其分布函数(CDF):

$$\begin{aligned}
 F_k(x) &= \int_{-\infty}^x f_k(x) dx \\
 &= \int_0^x k \binom{M/2}{k} F^{k-1}(x) f(x) [1 - F(x)]^{M/2-k} dx \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中 $f(x)$ 是 K 分布的 PDF, $F(x)$ 是 K 分布的 CDF。

对于 OSGO-CFAR, 杂波功率水平估计 $Z = \max(X, Y)$ 的 PDF^[4]:

$$\begin{aligned}
 f_z(z) &= f_X(z)F_Y(z) + f_Y(z)F_X(z) \\
 &= 2f_X(z)F_X(z) = 2f_k(x)F_k(x) \Big|_{x=z} \quad (5)
 \end{aligned}$$

根据式(3), (4), (5)可以推得 OSGO-CFAR 检测器的虚警概率:

$$\begin{aligned}
 P_{fa} &= P(D \geq TZ) = \int_0^\infty \int_{Tz}^\infty f(x)f_z(z) dx dz \\
 &= \int_0^\infty F(x) \Big|_{Tz}^\infty f_z(z) dz = \int_0^\infty [1 - F(Tz)] f_z(z) dz \\
 &= \int_0^\infty \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{Tcz}{2}\right)^v K_v(Tcz) c k \binom{M/2}{k} \left[\frac{2\left(\frac{cz}{2}\right)^v}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1} \\
 &\quad \cdot K_{v-1}(cz) K_v^{M/2-k}(cz) \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{cz}{2}\right)^v K_v(cz)\right]^{k-1} \\
 &\quad \times \int_0^z c k \binom{M/2}{k} \left[\frac{2\left(\frac{cx}{2}\right)^v}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1} \cdot K_{v-1}(cx) K_v^{M/2-k}(cx) \\
 &\quad \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{cx}{2}\right)^v K_v(cx)\right]^{k-1} dx dz \quad (6)
 \end{aligned}$$

令 $u = cz$, $p = cx$, 则式(6)变为

$$\begin{aligned}
 P_{fa} &= \int_0^\infty \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{Tu}{2}\right)^v K_v(Tu) k \binom{M/2}{k} \left[\frac{2\left(\frac{u}{2}\right)^v}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1} \\
 &= K_{v-1}(u) K_v^{M/2-k}(u) \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{u}{2}\right)^v K_v(u)\right]^{k-1} \\
 &\quad \times \int_0^u k \binom{M/2}{k} \left[\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^v}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1} K_{v-1}(p) K_v^{M/2-k}(p) \\
 &\quad \cdot \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{p}{2}\right)^v K_v(p)\right]^{k-1} dp du \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中 T 为门限系数, 由式(7)可以看出, 形状因子 v 已知时, P_{fa} 与尺度因子 c 无关, 所以 OSGO-CFAR 在 K 分布杂波中具有恒虚警性能。对于 OSSO-CFAR, 我们可以得到同样的结论。利用数值积分的方法, 可以得到 P_{fa} 与门限系数 T 的关系。图2是 $M=32, k=12$ 时, 不同 v 值情况下两种检测器虚警概率与门限系数的关系曲线。

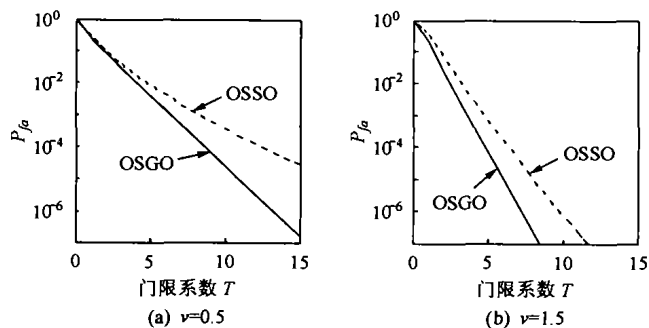


图2 虚警概率与门限系数 T 的关系

3 性能分析

3.1 最佳序值 k 的选取

为了分析检测性能,我们首先要确定 k 的最佳值。在满足恒定虚警概率的基础上, k 的选取原则就是使检测概率 P_d 最大,我们采用平均检测门限(ADT)作为衡量标准^[5]。

对于不同的形状参数 ν , 在预先给定虚警概率 $P_{fa} = 1E-06$ 、杂波平均功率 $\mu = 2$ 和参考单元长度 $M = 32$ 的条件下,图3给出了一组依赖于参数 k 的 ADT 曲线。从图中可以看出,在 $\nu = 1.5$ 和 $\nu = 5$ 的情况下,对于 OS, $k = \frac{3}{4}M \sim 7/8M$,对于 OSGO 和 OSSO, $k = \frac{3}{4} \times \frac{M}{2} \sim \frac{7}{8} \times \frac{M}{2}$ 时,检测器基本上具有最小的检测损失,这与瑞利混响情况($\nu \rightarrow \infty$)是一致的^[3],而且使 ADT 最小的 k 值与形状参数 ν 无关。再考虑到对抗多目标的情况,序值越小检测器对抗多目标的能力越强,所以我们选择了前者作为最佳序值。在下文分析中,对于 OSGO- 和 OSSO-CFAR, k 取 $\frac{3}{4} \times \frac{M}{2}$,而 OS-CFAR, k 取 $\frac{3}{4} \times M$ 。

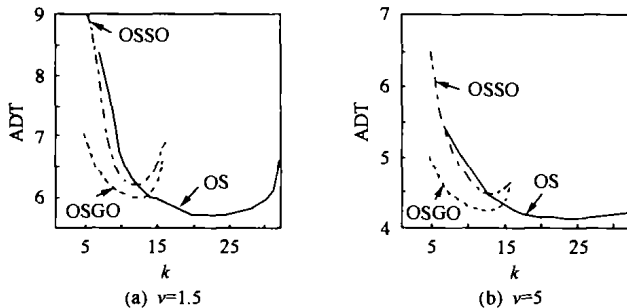


图3 OS, OSGO 和 OSSO 的平均检测门限

3.2 均匀背景下检测性能分析

正弦信号与 K 分布杂波之和的分布称为 K-莱斯分布,其 PDF^[6]:

$$f(x|H_1) = \int_0^\infty \frac{x}{r} \exp\left[-\frac{x^2 + A^2}{2r}\right] I_0\left(\frac{Ax}{r}\right) f(r) dr \quad (8)$$

其中 r 服从 Gamma 分布, A 为正弦信号的幅度,如果目标是 SwerlingII 型目标, A 服从瑞利分布,式(8)还需对 A 求统计平均。CFAR 检测器检测概率 P_d 的统一表达式为^[6]:

$$P_d = \int_0^\infty \int_{T_z}^\infty f(x|H_1) f(z) dx dz \quad (9)$$

对于不同的 CFAR 检测器,杂波功率水平估计 Z 的 PDF 是不同的。图4是 $M = 32$, $\nu = 1.5$, 目标类型是 SwerlingII 型时,不同虚警概率条件下3种检测器的检测性能曲线。

从图4可以看出,均匀 K 杂波背景下,OSGO-CFAR 检测器的检测性能与 OS-CFAR 相差无几,只有很小的检测损失,典型值都落在 0.1—0.2dB 之间,而 OSSO-CFAR 带来的检测损失相对较大,一般在 0.5dB 以上。

3.3 杂波边缘环境中的性能分析

杂波边缘是指杂波从一种强度变成另一种强度时过渡

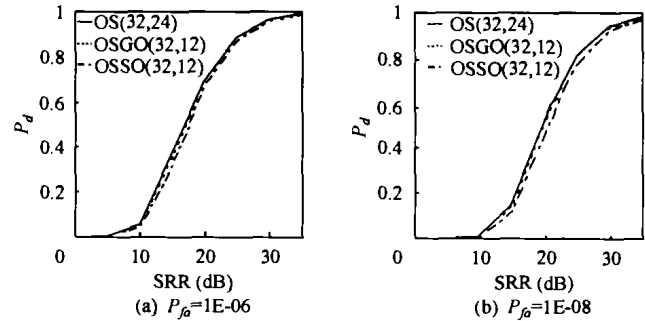


图4 OS-, OSGO- 和 OSSO-CFAR 检测器的性能

区的情况,典型的例子是降雨、降雪区的边缘。由于它的存在,恒虚警性能将会受到比较大的影响。在瑞利杂波中,两侧参考单元选大(GO)算法可以在杂波边缘中较好的控制虚警率。文献[7]给出了 OS-, OSGO-, OSSO-CFAR 在瑞利杂波环境下在杂波边缘环境中控制虚警能力的理论分析,采用其方法我们可以得到 K 分布杂波环境下3种检测器在杂波边缘环境中虚警率的精确解析表达式,但比较复杂,计算起来也很困难,所以我们借助 Monte-Carlo 仿真方法来分析每个检测器在杂波边缘的性能,并且只考虑形状参数不变,尺度参数改变的情况。而对于形状参数改变的杂波边缘情况,需要进行双参恒虚警处理。

下面我们建立一个具有 32 个距离单元的杂波模型,杂波边缘发生在距离单元 17,假设小功率杂波位于距离单元 1 到 16,大功率杂波位于距离单元 17 到 32。仿真时,在杂波模型两边添加额外的距离单元,从而使参考单元满足设定的长度。对于每个测试单元,仿真次数为 40000 次,以提供可靠的仿真结果。

图5给出的是 OS-, OSGO-, OSSO-CFAR 在虚警概率 $P_{fa} = 1E-03$, 形状参数 $\nu = 1.5$ 时的3组杂波功率比($r = 5, 10$ 和 15dB)杂波边缘环境中的性能曲线。横坐标是距离单元数,随着它的增加,也就是检测单元由杂波模型的左边向右边滑动, P_{fa} 首先下降,在检测单元扫过杂波边缘时, P_{fa} 有一个跳跃,形成虚警尖峰。虚警尖峰低说明 CFAR 检测器的虚警控制能力强。可以看出,在杂波边缘环境下,OSGO-CFAR 的虚警控制能力明显优于 OS- 和 OSSO-CFAR, 并且对 r 值的变化不敏感,对于不同的形状参数,也能得到同样的结论。

3.4 多目标情况下的性能分析

对于 OSGO- 和 OSSO-CFAR 检测器, $M/2 - k$ 是左右滑窗中干扰目标数的容许限度,我们来分析这种情况下强干扰目标的影响。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。对于在左边滑窗中有 IL 个干扰目标的情

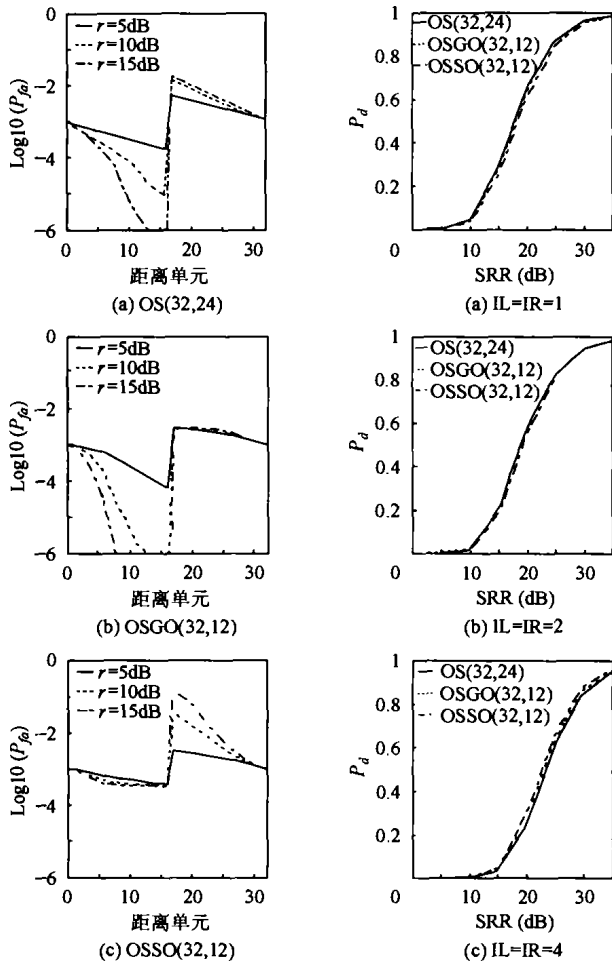


图5 OS-, OSGO- 和 OSSO-CFAR 检测器在杂波边缘的性能
图6 不同干扰目标个数情况下3种检测器的检测性能曲线

况,实际上我们所利用的是 $M/2 - IL$ 个样本中的第 k 个有序采样。在右边滑窗中有 IR 个干扰目标的情况,实际上取的是 $M/2 - IR$ 个样本中的第 k 个有序采样。

图6给出的是3种检测器在多目标情况下的检测性能曲线,其中干扰目标数为 $IL + IR$, 并假定干扰目标在前后滑窗中是均匀分布的,即 $IL = IR$, 目标类型是 SwerlingII 型, $P_{fa} = 1E-06$, $M = 32$, $\nu = 1.5$ 。

容易发现,随着左右滑窗中干扰目标数的增加,OSGO- 和 OSSO-CFAR 相对于 OS-CFAR 的检测损失逐渐减小,特别是当 $IL + IR$ 等于干扰目标数的容许限度8时,OSGO- 和 OSSO-CFAR 的检测性能已经优于 OS-CFAR 了。

4 结论

在恒虚警技术的应用中,杂波的分布形式决定恒虚警

检测器门限系数的确定,K分布杂波是一种重要的雷达杂波形式,以它为例进行分析具有重要意义。本文从理论上分析了K分布杂波背景下OSGO- 和 OSSO-CFAR 检测器的恒虚警性能,为检测器门限的设定提供了理论依据。并全面分析了K分布杂波背景中OSGO- 和 OSSO-CFAR 检测器的检测性能,可以看出,OSGO-CFAR 在均匀背景和多目标情况下具有和 OS-CFAR 相差无几的检测性能,而 OSGO 比 OS 和 OSSO 具有更好的杂波边缘干扰的适应性,并且它的处理时间只有 OS 的一半,更适合于实时处理。当然,本文的 CFAR 处理只限于均匀统计独立的K分布杂波,调制过程相关时的K分布杂波的建模和 CFAR 检测分析相对复杂,需要进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Ward K D. Compound representation of high resolution sea clutter. *Electronics Letters*, 1981, 17(16): 561 - 563.
- [2] 唐劲松, 朱兆达. K 分布杂波背景下次序统计恒虚警检测器的性能. *电子学报*, 1997, 25(6): 112 - 113.
- [3] 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, 第三章.
- [4] Elias A R, De Mercad M G, Davo E R. Analysis of some modified order statistic CFAR: OSGO and OSSO CFAR. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1990, 26(1): 197 - 202.
- [5] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1983, 19(4): 608 - 621.
- [6] 唐劲松. 高分辨率雷达目标检测与识别. [博士论文], 南京: 南京航空航天大学, 1996, 3.
- [7] Wilson S L. Two CFAR algorithm for interfering targets and nonhomogeneous clutter. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1993, 29(1): 57 - 72.

郝程鹏: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为信号处理。

侯朝焕: 男, 1936 年生, 研究员, 中科院院士, 研究方向为信号处理与大规模集成电路设计。

鄢 锦: 男, 1968 年生, 副研究员, 研究方向为水声物理与水声信号处理。

原建平: 男, 1973 年生, 副研究员, 研究方向为信号处理。