## 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<sup>\*\*\*</sup> Hou Chao-huan<sup>\*</sup> Yan Jin<sup>\*</sup> Yuan Jian-ping<sup>\*</sup> <sup>\*</sup>(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China) <sup>\*\*</sup>(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 perforemance 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<sup>[1]</sup>。 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)<sup>[2]</sup>:

$$f(x) = \frac{2c}{\Gamma(v)} \left(\frac{cx}{2}\right)^{\nu} K_{\nu-1}(cx)$$
(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,  $0.1 < v \le \infty$ , 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

$$F(x) = \int_{0}^{x} f(x) dx = \int_{0}^{x} \frac{2c}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{cx}{2}\right)^{\nu} K_{\nu-1}(cx) dx$$
  
=  $\int_{0}^{cx} \frac{2}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{X}{2}\right)^{\nu} K_{\nu-1}(X) dX$   
=  $-\frac{2}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{X}{2}\right)^{\nu} K_{\nu}(X) |_{0}^{cx} = 1 - \frac{2}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{cx}{2}\right)^{\nu} K_{\nu}(cx)$  (2)

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<sup>[3]</sup>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, $D \stackrel{H_1}{\geq} T_2$ 其中 $H_1$ 表示目在, $H_0$ 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,X1,…,XM 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<sup>[4]</sup>:

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

其分布函数(CDF):

$$F_{k}(x) = \int_{-\infty}^{x} f_{k}(x) dx$$
  
=  $\int_{0}^{x} k {M/2 \choose k} F^{k-1}(x) f(x) [1 - F(x)]^{M/2 - k} dx$  (4)

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<sup>[4]</sup>:

$$f_{z}(z) = f_{X}(z)F_{Y}(z) + f_{Y}(z)F_{X}(z)$$
  
=  $2f_{X}(z)F_{X}(z) = 2f_{k}(x)F_{k}(x)|_{x=z}$  (5)

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

$$P_{fa} = P(D \ge TZ) = \int_{0}^{\infty} \int_{T_{z}}^{\infty} f(x) f_{z}(z) dx dz$$

$$= \int_{0}^{\infty} F(x) \Big|_{T_{z}}^{\infty} f_{z}(z) dz = \int_{0}^{\infty} [1 - F(Tz)] f_{z}(z) dz$$

$$= \int_{0}^{\infty} \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{Tcz}{2}\right)^{v} K_{v}(Tcz) ck \left(\frac{M/2}{k}\right) \left[\frac{2\left(\frac{cz}{2}\right)^{v}}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1}$$

$$\cdot K_{v-1}(cz) K_{v}^{M/2-k}(cz) \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{cz}{2}\right)^{v} K_{v}(cz)\right]^{k-1}$$

$$\times \int_{0}^{z} ck \left(\frac{M/2}{k}\right) \left[\frac{2\left(\frac{cx}{2}\right)^{v}}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1} \cdot K_{v-1}(cx) K_{v}^{M/2-k}(cx)$$

$$\left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{cx}{2}\right)^{v} K_{v}(cx)\right]^{k-1} dx dz \qquad (6)$$

令u = cz, p = cx, 则式(6)变为

$$P_{fa} = \int_{0}^{\infty} \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{Tu}{2}\right)^{v} K_{v}(Tu) k \binom{M/2}{k} \left[\frac{2\left(\frac{u}{2}\right)^{v}}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1}$$
$$= K_{v-1}(u) K_{v}^{M/2-k}(u) \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{u}{2}\right)^{v} K_{v}(u)\right]^{k-1}$$
$$\times \int_{0}^{u} k \binom{M/2}{k} \left[\frac{2\left(\frac{p}{2}\right)^{v}}{\Gamma(v)}\right]^{M/2-k+1} K_{v-1}(p) K_{v}^{M/2-k}(p)$$
$$\cdot \left[1 - \frac{2}{\Gamma(v)} \left(\frac{p}{2}\right)^{v} K_{v}(p)\right]^{k-1} dp du$$
(7)

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 器處警概率与门限系数的关系曲线。



#### 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<sub>a</sub> 最大,我们采用平均检测门限(ADT)作为衡量标准<sup>[5]</sup>。

对于不同的形状参数v,在预先给定虚警概率  $P_{fo}$  = 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v=1.5 和v=5 的情况下,对于 OS,  $k = \frac{3}{4}M$ ~7/8M,对于 OSGO 和 OSSO,  $k = \frac{3}{4} \times \frac{M_2}{2} - \frac{7}{8} \times \frac{M_2}{2}$ 时, 检测器基本上具有最小的检测损失,这与瑞利混响情况( $v \rightarrow \infty$ )是一致的<sup>[3]</sup>,而且使 ADT 最小的 k 值与形状参数 v 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  $\frac{3}{4} \times \frac{M_2}{2}$ ,而 OS-CFAR, k取  $\frac{3}{4} \times M$ 。



#### 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<sup>[6]</sup>:

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

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<sub>d</sub>的统一表达式为<sup>[6]</sup>:

$$P_d = \int_0^\infty \int_{T_z}^\infty f(x \mid H_1) f(z) \,\mathrm{d}x \,\mathrm{d}z \tag{9}$$

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, v=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 在處警概率 *P<sub>fa</sub>* = 1E-03, 形状参数 *v* = 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<sub>fa</sub>* 首先下降,在检测单元扫过杂波边缘时,*P<sub>fa</sub>* 有一个 跳跃,形成處警尖锋。處警尖锋低说明 CFAR 检测器的處警 控制能力强。可以看出,在杂波边缘环境下,OSGO-CFAR 的處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



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, v = 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

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

- 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、
- 鄒 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.