

一种 K-分布杂波背景下的双参数恒虚警检测器

郝程鹏 侯朝焕

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要: 该文基于改进的 M-估计器和 OSGO-CFAR 检测器, 提出了 K-分布杂波背景下一种新的双参数恒虚警检测器, 然后在均匀干扰背景中研究了这种检测器的性能, 并与固定形状参数的 OSGO-CFAR 检测器进行了比较。结果表明, 具有形状参数估计的 OSGO 相对于理想固定形状参数 OSGO 只带来很小的附加损失, 同时具有更广泛的 K-分布杂波适应性。

关键词: K-分布; 形状参数; 估计器

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0756-04

A Two Parameter CFAR Detector in K-Distribution Clutter

Hao Cheng-peng Hou Chao-huan

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A new two parameter CFAR detector in K-distribution clutter based on enhanced M-estimator and OSGO-CFAR detector is proposed in this paper. The performance of the detector is analyzed against uniform clutter background. Compared to OSGO with given shape parameter, the OSGO with shape parameter estimation has little additional detection loss against uniform clutter background, and has broad adaptation to K-distributed clutter.

Key words: K-distribution; Shape parameter; Estimator

1 引言

恒虚警处理是一个提供检测阈值的信号处理算法, 其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, 并由此得到可以避免杂波背景变化影响的检测阈值, 使目标的检测具有恒定的虚警概率。近些年来对高分辨率雷达杂波和声纳混响的研究结果表明, K-分布是最为有效的描述其分布的模型, 瑞利分布只是其中的一种特殊情况^[1], 因而有关 K-分布背景下的 CFAR 技术研究已倍受重视。文献[2]研究了有序统计(OS)CFAR 检测器在 K-分布杂波中的性能, 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, 并且处理时间比较长。文献[3]研究了有序统计选大(OSGO)和有序统计选小(OSSO)CFAR 检测器, 结果表明 OSGO 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, 在杂波边缘环境中性能则大大优于 OS, 而且处理时间只有 OS 的一半。当然以上检测器的分析只限于固定形状参数, 即假设 K-分布的形状参数是已知的。但实际上一般很难事先知道形状参数的确切值, 因此, 研究形状参数未知时的 CFAR 更有意义。这需要在自适应检测中实时估计形状参数, 为了

能基本保持虚警概率的同时获得更高的检测概率, 对形状参数必须使用一种好的估计方法。本文在对 M-估计器^[4]进行分析的基础上, 提出了一种改进的自适应估计方法, 并将它与 OSGO 结合起来, 获得了 K-分布杂波背景下一种新的双参数恒虚警检测器。本文余下部分安排如下: 第2节介绍 OSGO-CFAR 检测器, 第3节提出改进的 M-估计器, 第4节对具有形状参数估计的 OSGO-CFAR 检测器进行性能分析, 最后是结束语。

2 K-分布杂波背景下的 OSGO-CFAR 检测器

K-分布是描述合成孔径雷达杂波和高分辨率主动声纳混响分布的比较好的概率模型, 其概率密度函数(PDF)为

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

其中 v 为形状参数, c 为尺度参数, 杂波的平均功率 $\mu = 4v/c^2$, $\Gamma(\bullet)$ 为 Gamma 函数, $K_{v-1}(\bullet)$ 为 $v-1$ 阶第二类修正贝塞尔函数。

形状参数 v 决定 K-分布偏离瑞利分布的程度, v 越小, 偏离程度越大, 在采用相同检测门限进行检测的情况下, 虚警概率越大。因此通过估计形状参数 v 来了解杂波分布的尖锐程度是非常必要的。

2005-08-09 收到, 2006-06-15 改回
国家自然科学基金(60272087)资助课题

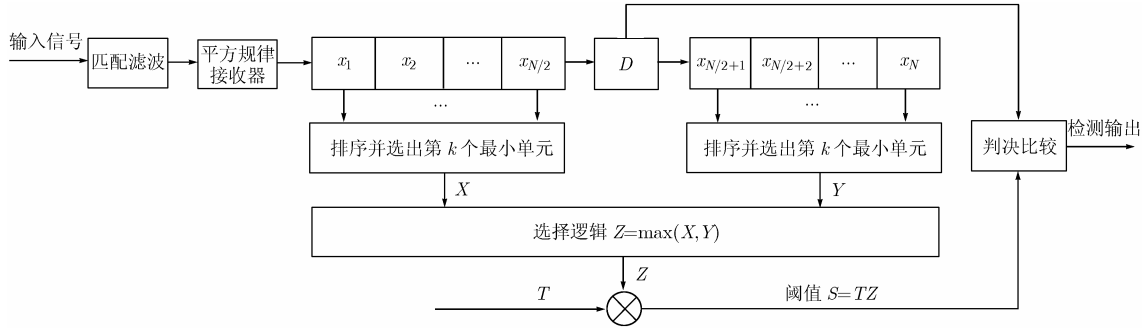


图1 OSGO-CFAR 检测器原理框图

有序统计最大选择(OSGO)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 $N/2$, 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 $N/2$ 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 。 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 $D \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} TZ$, 其中, H_1 表示目标存在, H_0 表示目标不存在。

文献[3]证明了形状参数已知条件下 OSGO-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。与 OS 相比, OSGO 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。

3 改进的 M-估计器

文献[4]基于 K-分布的多个矩, 提出了一种新的 K-分布形状参数估计器——M-估计器。对于观测数据 x_1, x_2, \dots, x_N , M-估计器所采用的统计量为

$$\hat{M} \equiv \alpha \hat{X} + (1-\alpha)\hat{U} = \alpha \left(\frac{[x^2 \ln x^2]}{[x^2]} - \log[x^2] \right) + (1-\alpha) \cdot ([\ln(x^2)] - \ln([x^2])) \quad (2)$$

$$M = E[\hat{M}] = \alpha \left(1 + \frac{1}{v} \right) + (1-\alpha)(\phi^0(v) - \ln(v) - \gamma) \quad (3)$$

其中 α 为加权因子, 决定 U, X 分量在 M-估计器中所占的比重, $[f(z)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(z_i)$, 将观测数据 x_1, x_2, \dots, x_N 代入式(2)计算出统计量值, 然后根据式(3)的转换关系将统计量转换成对形状参数的估值。对于每一个 α 值, M-估计器不可能在整个 v 值范围内都提供最小的估计误差, 在大 v 值范围, $\alpha = 0.5$ 时估计误差基本上是最小的, 在小 v 值范围, $\alpha = 0.15$ 时估计误差基本上最小, 图 2 是采

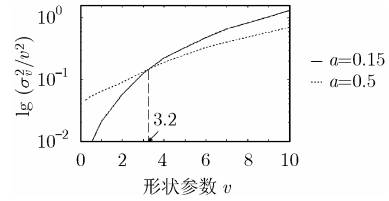


图2 两种情况下 M-估计器的归一化误差

用 Monte-Carlo 仿真方法得到的这两种情况下的归一化误差曲线, 观测数据长度 $N = 256$, 可以看出两种情况的交叉点在 $v = 3.2$ 处。因为 v 值越小, K-分布偏离瑞利分布程度越大, 所以小 v 值范围的估计精度更加重要, 文献[4]选定 0.15 作为加权因子 α 的最佳值。

为兼顾大 v 值时的估计精度, 本文提出一种改进的自适应估计方法, 具体步骤是:

(1)根据观测数据计算出 U, X 分量值。

(2)取 $\alpha = 0.15$ 对 U, X 分量进行加权, 根据式(3)的转换关系将统计量转换成对形状参数的估值 $v_{\text{估}1}$ 。

(3)如果 $v_{\text{估}1} < 3.2$, 则最终估值 $v_{\text{估}} = v_{\text{估}1}$ 。

(4)如果 $v_{\text{估}1} \geq 3.2$, 取 $\alpha = 0.5$ 对 U, X 分量重新进行加权, 得到最终估值 $v_{\text{估}}$ 。

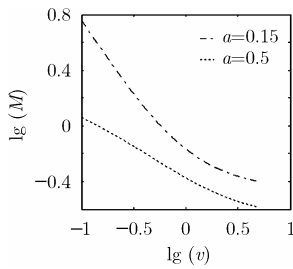
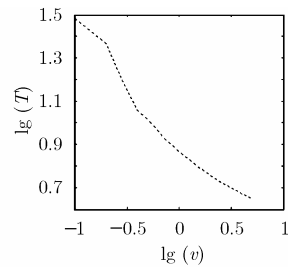
可见改进方法增加的计算量很小, 却综合了两种情况的优点, 在整个 v 值范围都提供比较小的估计误差。

4 具有形状参数估计的 OSGO-CFAR 检测器性能分析

将改进的 M-估计器和 OSGO-CFAR 检测器结合起来, 获得一种 K-分布杂波背景下的双参数恒虚警检测器, 下面分析这种具有形状参数估计的 OSGO-CFAR 检测器的性能。

4.1 虚警性能

在检测过程中, 用于估计形状参数的样值就是参考滑窗内的接收数据, 在多目标的情况下, 估计时应该从有序统计序列值中删除干扰目标值。在进行检测前, 要选定参考滑窗长度 N , 序值 k 和虚警概率 P_{fa} , 根据这些参数, 计算出门限因子 T 与形状参数 v 的函数关系及统计量 M 与形状参数 v 之间的函数关系。图 3 和图 4 给出了 $N = 128, k = 48, P_{\text{fa}} = 10^{-6}$ 时 M 与 v, T 与 v 的关系曲线。

图 3 M 与 v 的函数关系图 4 T 与 v 的函数关系

具体的检测步骤是:

(1) 对前后滑窗内的数据进行排序, 分别取第 k 个序值得到 X , Y 值, 然后取 X , Y 中的较大值作为背景功率估计 Z 。

(2) 利用参考滑窗内的观测数据, 采用改进的 M-估计器根据图 3 的转换关系得到形状参数估计值 $v_{\text{估}}$ 。

(3) 根据 $v_{\text{估}}$, 在图 4 中查找到相应的门限参数 $T_{\text{估}}$ 。

(4) 将 $T_{\text{估}}$ 与 Z 相乘, 得到自适应检测阈值 S , 判定当前检测单元是否存在目标。

(5) 重复步骤(1)–(4), 继续对下一个检测单元进行检测。

由于形状参数 v 已不再确定, 需要在自适应检测中重新分析检测性能。表 1 和表 2 分别给出了 $P_{\text{fa}} = 10^{-4}$ 和 10^{-6} 两种虚警概率条件下具有形状参数估计的 OSGO-CFAR 虚警性能仿真结果, 其中杂波为均匀背景, 参考滑窗中干扰目标数为零, 仿真次数至少是所设定的虚警概率倒数的 100 倍, 足以提供可靠的结果。

从表 1 和表 2 中看出, 实际虚警率要比设计值略高一点, 基本上能接受, 可以认为达到了所设计的 P_{fa} 值。对于某一固定形状参数 v 来说, 参考滑窗长度 N 越大, 仿真的虚警率值与设计值相差越小, 即较大的滑窗总是具有较好的估计性能。所以在形状参数估计方法确定的情况下, 还有一种提高虚警率精度的方法——增大参考滑窗长度 N , 但 N 的增大会导致计算量的增加, 因此在虚警率精度和 N 之间要折中考虑。

4.2 检测性能

下面借助 Monte Carlo 仿真方法分析具有形状参数估计 OSGO 的检测性能, 具体参数设置为 $v=0.5$, $P_{\text{fa}} = 10^{-6}$, 目标起伏模型为 SwerlingII 型。图 5 给出了

表 1 $P_{\text{fa}} = 10^{-4}$ 时具有形状参数估计 OSGO 的虚警性能

	形状参数 v	虚警概率 $P_{\text{fa}} (10^{-4})$	偏差 Δv	标准差 σ_v
$N=32$ $k=16$	0.2	1.190	0.0177	0.0485
	0.5	1.257	0.0775	0.2625
	1.0	1.560	0.7451	3.3081
	10.0	2.142	2.7221	3.8264
$N=64$ $k=30$	0.2	1.121	0.0084	0.0332
	0.5	1.165	0.0372	0.1159
	1.0	1.341	0.1852	0.9908
	10.0	1.478	2.1532	2.7213
$N=128$ $k=48$	0.2	1.121	0.0040	0.0231
	0.5	1.133	0.0145	0.0748
	1.0	1.243	0.0677	0.2466
	10.0	1.317	1.5026	2.0148

表 2 $P_{\text{fa}} = 10^{-6}$ 时具有形状参数估计 OSGO 的虚警性能

	形状参数 v	虚警概率 $P_{\text{fa}} (10^{-6})$	偏差 Δv	标准差 σ_v
$N=32$ $k=16$	0.2	1.50	0.0152	0.0483
	0.5	1.86	0.0752	0.2632
	1.0	5.88	0.7844	3.4716
	10.0	6.76	2.6912	3.8145
$N=64$ $k=30$	0.2	1.32	0.0080	0.0329
	0.5	1.39	0.0363	0.1192
	1.0	2.04	0.1707	0.9587
	10.0	3.26	2.1441	2.7206
$N=128$ $k=48$	0.2	1.28	0.0045	0.0226
	0.5	1.31	0.0178	0.0750
	1.0	1.49	0.0656	0.2442
	10.0	2.03	1.5248	2.0377

不同参考滑窗长度 N 和序值 k 时具有形状参数估计 OSGO 与固定形状参数 OSGO 的检测性能曲线,其中固定形状参数分为两种情况,一种是理想情况,即所设计的形状参数值与实际相符,另一种是形状参数偏差情况,所设计的形状参数值与实际不相符。从图 5 可以看出,相对于理想固定形状参数,具有形状参数估计 OSGO 所带来的检测损失很小。而形状参数偏差时固定形状参数 OSGO 的检测性能相对于理想情况相差很大,其中将实际形状参数 0.5 误认为 0.2 时,使设定的检测门限参数 T 增大,结果带来很大的检测损失。而将实际形状参数 0.5 误认为 1 时,设定的检测门限参数 T 值又相对较小,虽然检测概率提高了,却是以牺牲虚警概率为条件的,虚警概率上升一个数量级以上。

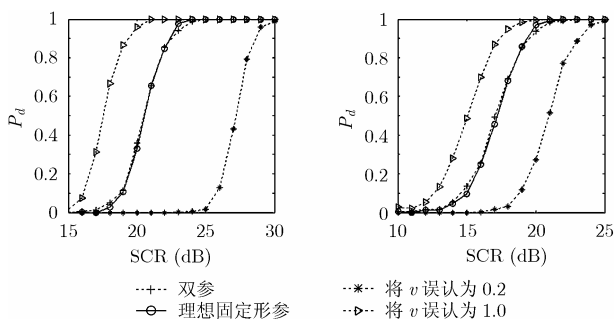


图 5 具有形状参数估计 OSGO 与固定形状参数 OSGO 检测性能比较

5 结束语

本文在对 M-估计器进行分析的基础上,提出了一种改进的自适应估计方法,它在整个 v 值范围都提供比较小的估计误差。然后将改进的 M-估计器与 OSGO-CFAR 结合起来,提出了 K-分布杂波背景下一种新的双参恒虚警检测器。在均匀干扰背景中研究了这种检测器的性能,

从仿真结果来看,虚警概率与所设计的值相差不大,相对于理想固定形状参数 OSGO,它带来的检测损失很小。同时这种检测器具有更广泛的 K-分布杂波适应性,所以,该检测器是 K-分布杂波背景中形状参数未知情况下的一种性能尚佳的 CFAR 检测器。

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] 郝程鹏,侯朝焕,鄢锦等. OSGO 和 OSSO-CFAR 在 K 分布杂波背景下的性能分析. *电子与信息学报*, 2005, 27(7): 1061-1064.
- [4] Hao Cheng-peng, Hou Chao-huan, and Yan Jin, *et al.* Performance analysis of OSGO- and OSSO-CFAR in K-distribution clutter. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(7): 1061-1064.
- [4] 郝程鹏,侯朝焕,鄢锦等. 一种新的 K 分布形状参数估计器. *电子与信息学报*, 2005, 27(9): 1404-1407.
- Hao Cheng-peng, Hou Chao-huan, and Yan Jin. A new estimator for estimating the parameters of K-Distribution. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(9): 1404-1407.

郝程鹏: 男, 1975年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为信号检测与估计、雷达、声纳恒虚警处理。

侯朝焕: 男, 1936年生, 研究员, 博士生导师, 中科院院士, 信息、信号处理和声学专家, 国家自然科学基金委信息科学部主任, 国家973项目首席科学家, 主要研究方向为信号处理与大规模集成电路设计。