

两种恒虚警检测器在干扰边缘中的性能分析¹

关 键 词 何 友

(海军航空工程学院 烟台 264001)

摘 要 本文研究 GOSGO(Generalised Order Statistics and Greatest Of) 和 GOSSO(Generalised Order Statistics and Smallest Of)-CFAR 检测器在干扰边缘中的性能。文中推导出了它们在干扰边缘环境中虚警概率的解析表达式, 分析了它们抗边缘干扰的性能, 并且与 OS(Order Statistics)、CA(Cell Averaging)、GO(Greatest Of) 和 SO(Smallest Of) 等检测器进行了比较。结果表明, 与抗边缘干扰性能较好的 GO 相比, GOSGO 的抗边缘干扰性能又有明显的增强。但是, GOSSO 的抗边缘干扰性能却很不理想。

关键词 雷达, 信号检测, 恒虚警率, 干扰边缘

中图分类号 TN950, TN911.7

1 引 言

在雷达自动检测系统中, 对于一固定检测门限, 如果干扰电平增大几分贝, 虚警率将急剧增加。因此, 在强干扰中提取信号, 不仅要求有一定的信噪比, 而且要求检测器具有恒虚警性能。现有的恒虚警率 (CFAR) 处理方法种类繁多, 它们本质差别在于求取检测门限的方式。经典的 CA(Cell Averaging) 方法^[1] 在均匀背景中具有良好的检测性能。但是在多目标或干扰边缘环境中的性能严重恶化。GO(Greatest Of)^[2] 方法具有较好的虚警控制能力。SO(Smallest Of) 方法^[3] 能较好地分辨空间近距离目标, 但是在均匀背景中的检测性能和控制虚警性能都很差。OS(Order Statistics) 方法^[4] 和 SO 在多目标环境中比 CA 和 GO 的检测性能好。在均匀背景中, CA 的检测性能最好。在干扰边缘情况下 GO 的控制虚警能力最强。与 OS, CA, GO 和 SO 相比, GOSGO(Generalised Order Statistics and Greatest Of)^[5] 不仅有良好的检测性能, 而且在干扰边缘出现时也有极佳的虚警控制能力。然而 GOSSO(Generalised Order Statistics and Smallest Of)^[5] 抗边缘干扰的性能却很差。本文将建立 GOSGO- 和 GOSSO-CFAR 检测器在干扰边缘情况下的虚警模型, 并分析它们抗边缘干扰的性能。

2 检测器结构和背景模型

GOSGO- 和 GOSSO-CFAR 检测器方框图在文献 [5] 的图 1 中给出。参考滑窗长度 $R = M + N$; M , N 分别为前沿和后沿参考滑窗长度。 X 和 Y 分别是前沿滑窗和后沿滑窗的局部估计。 Z 是由参考单元采样根据 GOSGO 或 GOSSO 算法产生的背景噪声估计。

¹ 1994-06-22 收到, 1994-10-21 定稿
国防科研基金资助课题

因为这里只考虑虚警率, 所以与目标模型无关。假设接收机噪声是高斯分布, 检测包络是瑞利分布, 且经过平方律检波器, 则参考单元幅值服从指数分布。并且假设噪声功率有一个阶跃, N'_0 和 N_0 分别是两种强度的噪声功率谱密度。设 $\gamma = N_0/N'_0$ 。因为虚警概率只取决于两种噪声功率谱密度之比, 而与其中任何一种噪声的绝对强度无关。所以, 如果取 $N_0 = 1$, 则可以简化干扰分布的概率密度函数。假设 $M+N$ 个参考单元中有 C 个单元服从分布

$$p_1(x) = \gamma \exp(-\gamma x), \quad (1)$$

有 $M+N-C$ 个单元服从分布

$$p_2(x) = \exp(-x). \quad (2)$$

3 GOSGO- 和 GOSSO-CFAR 检测器的基本模型

GOSGO 和 GOSSO 这两种广义有序统计 CFAR 检测器均使用如下的局部估计器

$$X = x(k), \quad Y = y(l). \quad (3)$$

在 $0 \leq C \leq M$ 时, 前沿滑窗是 OS 算法的干扰边缘情况, 而后沿滑窗是充满幅值服从 $\exp(-x)$ 分布的均匀干扰情况。参照文献 [6] 得到定义在 (6) 式中的 X 和 Y 的概率密度函数在 $0 \leq C \leq M$ 时为

$$\begin{aligned} f_X(x) = & \sum_{i=k}^M \sum_{j=\max(0, i-C)}^{\min(i, M-C)} \binom{C}{i-j} \binom{M-C}{j} \sum_{n_1=0}^j \binom{j}{n_1} (-1)^{n_1} \\ & \times \sum_{n_2=0}^{i-j} \binom{i-j}{n_2} (-1)^{n_2} (-b) \exp(-bx), \end{aligned} \quad (4)$$

$$f_Y(y) = l \binom{N}{l} \sum_{r=0}^{l-1} \binom{l-1}{r} (-1)^r \exp(-ay), \quad (5)$$

其中

$$a = r + N - l + 1, \quad (6)$$

$$b = n_1 + M - C - j + \gamma(n_2 + C - i + j). \quad (7)$$

为便于书写, 我们用一个函数 Q 代替 (4) 式右边

$$\begin{aligned} Q(k, M; C; q) = & \sum_{i=k}^M \sum_{j=\max(0, i-C)}^{\min(i, M-C)} \binom{C}{i-j} \binom{M-C}{j} \sum_{n_1=0}^j \binom{j}{n_1} (-1)^{n_1} \\ & \times \sum_{n_2=0}^{i-j} \binom{i-j}{n_2} (-1)^{n_2} q \end{aligned} \quad (8)$$

则 (4) 式化为

$$f_X(x) = Q[k, M; C; -b \exp(-bx)]. \quad (9)$$

而它们的概率分布函数为

$$F_X(x) = Q[k, M; C; \exp(-bx)], \quad (10)$$

$$F_Y(y) = l \binom{N}{l} \sum_{r=0}^{l-1} \binom{l-1}{r} \frac{(-1)^r}{a} [1 - \exp(-ay)]. \quad (11)$$

当 $M \leq C \leq M + N$ 时, 前沿滑窗中已是充满幅值服从 $\gamma \exp(-\gamma x)$ 分布的均匀干扰情况, 而后沿中出现的是 OS 算法的干扰边缘情况, 则 X 和 Y 的概率密度函数为

$$f_X(x) = \gamma k \binom{M}{k} \sum_{r=0}^{k-1} \binom{k-1}{r} (-1)^r \exp(-x\gamma d) \quad (12)$$

$$f_Y(y) = Q[l, N; C - M; -f \exp(-fy)], \quad (13)$$

其中

$$d = r + M - k + 1, \quad (14)$$

$$f = n_1 + N - C + M - j + \gamma(n_2 + C - M - i + j). \quad (15)$$

而它们的概率分布函数为

$$F_X(x) = \gamma k \binom{M}{k} \sum_{r=0}^{k-1} \binom{k-1}{r} (-1)^r \frac{1 - \exp(-x\gamma d)}{\gamma d}, \quad (16)$$

$$F_Y(y) = Q[l, N; C - M; \exp(-fy)]. \quad (17)$$

4 GOSGO- 和 GOSSO-CFAR 检测器的虚警模型

GOSGO-CFAR 检测器选两个局部估计中较大的作为总的干扰功率水平估计 Z , 则 Z 的概率密度函数为^[7]

$$f_Z(z) = f_X(z)F_Y(z) + f_Y(z)F_X(z). \quad (18)$$

由(4)~(11)式和(18)式可得 GOSGO-CFAR 检测器的虚警概率在 $0 \leq C \leq M$ 时为

$$P_{fa} = l \binom{N}{l} \sum_{r=0}^{l-1} \binom{l-1}{r} (-1)^r Q \left(k, M; C; \frac{T}{(T+b)(T+a+b)} \right). \quad (19)$$

上式包括 $C = M$ 时, 但检测单元幅值仍然服从 $\exp(-x)$ 分布的情况。

由(12)~(17)式和(18)式可得 GOSGO-CFAR 检测器的虚警概率在 $M \leq C \leq M + N$ 时为

$$P_{fa} = \gamma k \binom{M}{k} \sum_{r=0}^{k-1} \left[\binom{k-1}{r} (-1)^r Q \left(l, N; C - M; \frac{\gamma T}{(\gamma T + f)(\gamma T + \gamma d + f)} \right) \right]. \quad (20)$$

上式包含了 $C = M$ 时, 检测单元幅值服从 $\gamma \exp(-\gamma x)$ 的情况。

GOSSO-CFAR 检测器选两个局部估计中较小的作为总的干扰功率水平估计 Z , Z 的概率密度函数由文献 [7] 给出

$$f_Z(z) = f_X(z) + f_Y(z) - [f_X(z)F_Y(z) + f_Y(z)F_X(z)]. \quad (21)$$

在 $0 \leq C \leq M$ 时, 由上式和 (4)~(11) 式得到 GOSSO-CFAR 检测器的虚警概率为

$$P_{fa} = Q\left(k, M; C; \frac{T}{T+b}\right) + l \binom{N}{l} \sum_{r=0}^{l-1} \binom{l-1}{r} (-1)^r \frac{1}{T+a} - l \binom{N}{l} \sum_{r=0}^{l-1} \left[\binom{l-1}{r} \right. \\ \left. \times \frac{(-1)^r}{a} Q\left(k, M; C; \left(\frac{T}{T+b} - \frac{T}{T+a+b}\right)\right) \right]. \quad (22)$$

上式包括 $C = M$ 时, 检测单元幅值仍然服从 $\exp(-x)$ 分布的情况。

由 (12)~(17) 式和 (21) 式得 GOSSO-CFAR 检测器的虚警概率在 $M \leq C \leq M + N$ 时为

$$P_{fa} = k \binom{M}{k} \sum_{r=0}^{k-1} \left[\binom{k-1}{r} (-1)^r \frac{1}{d+T} \right] + Q\left(l, N; C - M; \frac{\gamma T}{\gamma T + f}\right) \\ - \gamma k \binom{M}{k} \sum_{r=0}^{k-1} \left[\binom{k-1}{r} (-1)^r Q\left(l, N; C - M; \frac{\gamma T}{(\gamma T + f)(\gamma T + \gamma d + f)}\right) \right]. \quad (23)$$

上式包括 $C = M$ 时, 并且检测单元幅值服从 $\gamma \exp(-\gamma x)$ 分布的情况。

5 GOSGO- 和 GOSSO-CFAR 检测器在干扰边缘环境中的性能分析

文献 [5] 已经分析了这两种 CFAR 检测器在均匀干扰和多目标环境中的检测性能。下面将继续分析它们在干扰边缘环境中抗边缘干扰的性能。

GOSGO-CFAR 检测器在 $k = M$, $l = 1$ 时 GOSGO 的虚警控制能力最强。考虑到在多目标情况中发挥 GOSGO 所具有的 OS 的优点, k 的选择还应该留有余量。并且为了提高检测性能, l 也应该选的足够大, 以降低 ADT(Average Decision Threshold) 值 [5]。图 1 给出了在 CNR=15dB 的干扰边缘环境中, GOSGO 的虚警概率与参考滑窗中强干扰单元数的关系曲线。从总体上看, GOSGO 的虚警尖峰很低, 在 CNR=15dB 时一般能保持在 10^{-5} 的数量级左右, 继承了 GO 的优点。而且 k 越大, l 越小, 虚警尖峰越低。这与提高检测性能的 k , l 取值是相符合的。因此, 对于 GOSGO-CFAR 检测器的虚警尖峰控制, 大 k 值和小 l 值比较有效。在 k 较大时虚警尖峰已经很低, 它对 CNR 的变化不是很敏感。例如, $M = 24$, $k = 18$, $N = 8$, $l = 8$ 时, 有下面一组虚警尖峰数据:

$$\text{CNR}=5\text{dB}, \quad P_{fa\text{-spike}} = 3.165615 \times 10^{-5},$$

$$\text{CNR}=15\text{dB}, \quad P_{fa\text{-spike}} = 5.999655 \times 10^{-5},$$

$$\text{CNR}=25\text{dB}, \quad P_{fa\text{-spike}} = 5.999588 \times 10^{-5}.$$

这说明 GOSGO-CFAR 检测器在强干扰环境中的良好虚警控制性能。

GOSSO 在 k 和 l 值的一定取值范围内虚警尖峰几乎不随 k 变化。GOSSO 的虚警尖峰随 k 和 l 值的变化比 GOSGO 剧烈。在 $k = 1$, $l = N$ 时的 GOSSO 的虚警尖峰最低 [6]。考

考虑到提高检测性能， k 和 l 应选取适当的值，以降低 ADT 值，在获得较好的虚警控制能力的同时也不使检测性能有较大的损失。图 2 给出了 GOSSO 在干扰边缘环境中的几组性能曲线。总的看来，GOSSO 的虚警尖峰很高，达到了 10^{-1} 数量级。总之，GOSSO-CFAR 检测器的虚警尖峰控制是小 k 值和大 l 值比较有效。但是这正是与提高检测性能相冲突的。

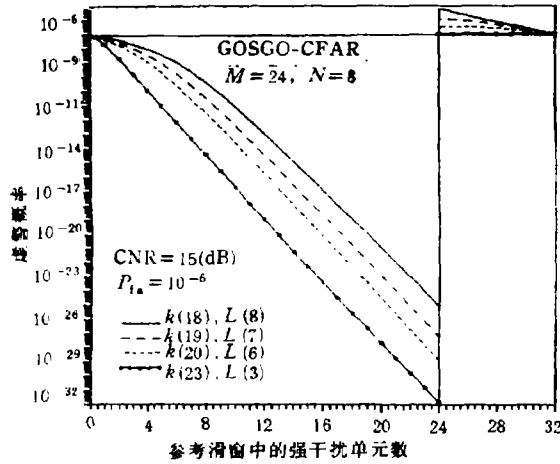


图 1 GOSGO 的抗边缘干扰性能 CNR=15(dB)

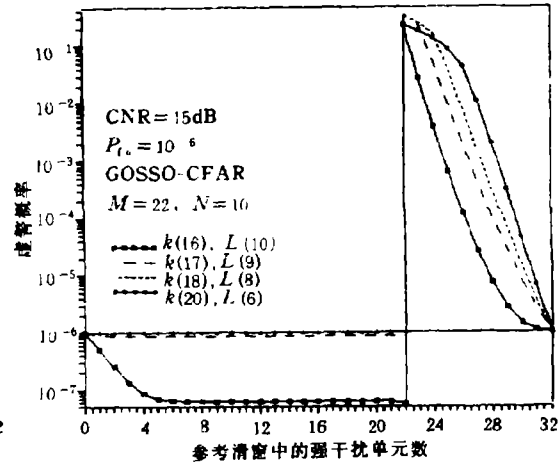


图 2 GOSSO 的抗边缘干扰性能 CNR=15(dB)

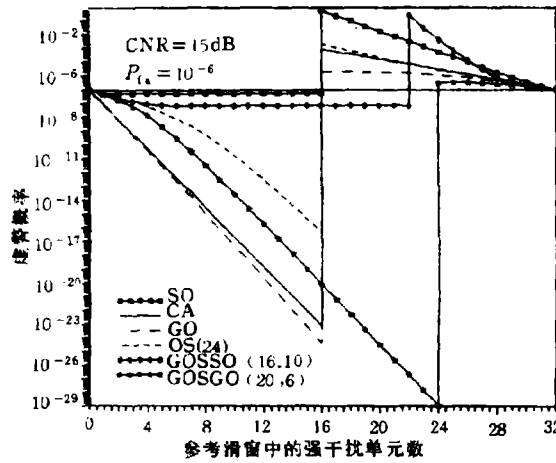


图 3 GOSGO, GOSSO 和几种典型方法的抗边缘干扰性能 CNR=15(dB)

图 3 给出了 GOSGO(24(20), 8(6)) 和 GOSSO(22(16), 10(10)) 与 CA 等经典方法的抗边缘干扰性能曲线。由图可见，GOSGO 表现出了很强的虚警控制能力，甚至超过了 GO。因为 GOSGO 与 GO 相比，它除了都采用 GO 逻辑之外，还在局部估计上采用了 OS 方法，使之对干扰功率水平的估计更为合理。并且 GOSGO 还具有良好的检测性能^[5]。而 GOSSO 的虚警控制能力较差，它的虚警尖峰控制与检测性能提高是相冲突的。

以上的分析是针对 CNR 大于零而言，即干扰边缘前沿。在干扰边缘后沿情况，图 3 的 GOSGO 的参数选择会使虚警尖峰有所升高，但是也能保持与 OS 相当的水平。并且后沿扫

滑过检测单元时,虚警概率急剧下降,所以,参数的选择主要考虑前沿情况。这里 GOSGO 的参数选择同时还考虑了检测性能。因此我们认为在综合考虑时选择这个参数是合理的。

6 结 论

本文在文献 [5] 的基础上分析了 GOSGO- 和 GOSSO-CFAR 检测器在干扰边缘情况下的控制虚警能力,并与 OS, CA, GO 和 SO 等典型 CFAR 检测器进行了对比。结果表明, GOSGO-CFAR 检测器在干扰边缘环境中的控制虚警能力明显优于这几种典型 CFAR 处理器。甚至与抗边缘干扰性能较好的 GO 相比, GOSGO 的抗边缘干扰性能又有明显的增强,同时它在均匀背景和多目标情况下也具有良好的性能。而 GOSSO 的虚警控制能力较差。这也是预料之中的。在一般情况下,由相同的局部估计产生 Z 的过程中, GO 逻辑的虚警控制能力较强, SO 逻辑的虚警控制能力较差。

参 考 文 献

- [1] Finn H M, Jhonson R S. RCA Rev., 1968, 29(9): 414-463.
- [2] Hansen V G. Constant false alarm rate processing in search radars. In Proceedings of IEEE 1973 International Radar Conference, London: 1973, 325-332.
- [3] Trunk G V. IEEE Trans. on AES, 1978, AES-14(5): 750-755.
- [4] Rohling H. IEEE Trans. on AES, 1983, AES-19(4): 608-621.
- [5] 何 友, Rohling H. 电子科学学刊, 1994, 16(6): 582-590.
- [6] Wilson S L. IEEE Trans. on AES, 1993, AES-29(1): 57-72.
- [7] Gandhi P P, Kassam S A. IEEE Trans. on AES, 1988, AES-24(4): 427-445.
- [8] 关 键. 几种新的 CFAR 检测器在干扰边缘环境中的性能: [硕士学位论文]. 烟台: 海军航空工程学院电子工程系, 1994.

PERFORMANCE ANALYSIS OF TWO CFAR DETECTORS UNDER CLUTTER EDGE SITUATION

Guan Jian He You

(*Technical University of Yantai, Yantai 264001*)

Abstract This paper studies the performances of the GOSGO (Generalised Order Statistics and Greatest Of)- and GOSSO (Generalised Order Statistics and Smallest Of)-CFAR detectors under clutter edge situation. The analytic expressions of false alarm probabilities under clutter edge situation are derived. Their performances to counter clutter edge are analysed, and compared with those of the OS(Order Statistics), CA(Cell Averaging), GO(Greatest Of) and SO(Smallest Of) detectors. The results show that GOSGO possesses better performance than GO for countering clutter edge. But the performance of GOSSO is not good.

Key words Radar, Signal detection, CFAR, Clutter edge

关 键: 男, 1968 年生, 助理工程师, 硕士, 主要从事雷达自适应检测方法等方面的研究工作。

何 友: 男, 1956 年生, 教授, 硕士, 主要从事雷达自适应检测方法、多目标跟踪、多传感器信息融合、火炮射表编制和数据处理等方面的研究和教学工作。