

量化秩非参数 CFAR 检测器 在杂波边缘中的性能分析

孟祥伟

(烟台南山学院电气与电子工程系, 山东烟台 265713)

摘 要: 人们常用均匀背景、多目标和杂波边缘 3 种典型背景来衡量雷达目标检测器的性能,但在现有文献中缺乏量化秩(Rank Quantization, RQ)非参数检测器在杂波边缘中虚警概率的理论模型,缺乏 RQ 非参数检测器与经典的参量型检测器在杂波边缘中虚警控制能力的比较. 本文给出了 RQ 检测器在杂波边缘中虚警概率的解析表达式,并比较了它与非相干积累 CA (Cell Averaging), GO (Greatest Of), OS (Ordered Statistic) 恒虚警方法在杂波边缘中的虚警控制能力. 可以看出,采用高秩量化门限的 RQ 检测器的虚警控制能力要优于低秩量化门限的情况,在瑞利分布杂波边缘情况下, RQ 检测器的虚警控制能力与非相干积累 OS 方法接近. 但是当强杂波变为长拖尾分布的非高斯杂波时,非相干积累 CA, GO 和 OS 参量型检测方法的虚警概率产生了 3 个数量级以上的上升,且不能降回到原始设定的虚警概率. 而 RQ 检测器显示出了非参量检测器的优势,即当杂波背景分布类型发生变化后,它仍然可以保持虚警概率的恒定.

关键词: 雷达; 杂波; 韦布尔分布; 目标检测; 非参数; 恒虚警率

中图分类号: TN951; O212.7

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)02-0384-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.02.022

Performance Analysis of Rank Quantization Nonparametric CFAR Detector at Clutter Edge

MENG Xiang-wei

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yantai Nanshan University, Yantai, Shandong 265713, China)

Abstract: The performance evaluation of radar target detector is often carried out in 3 typical environments of homogeneous background, multiple targets situation and clutter edge. However, there is a lack of the mathematical model of the false alarm rate for the rank quantization (RQ) nonparametric detector at clutter boundaries, and lack of a comparison of the ability for the RQ detector to control the rise of the false alarm rate at clutter edges to that of the conventional parametric CFAR schemes. The analytic expression of the false alarm rate P_{fa} for the RQ nonparametric detector at clutter edges was derived in this paper, and the ability of the RQ nonparametric detector to control the rise of the false alarm rate at clutter edges was compared to that of the cell averaging (CA) CFAR, the greatest of (GO) CFAR and the ordered statistic (OS) CFAR with incoherent integration. It is shown that a high rank quantization threshold results in a low rise of the false alarm rate at clutter edges, and the rise of the RQ nonparametric detector at clutter edges is close to that of the OS-CFAR with incoherent integration in the Rayleigh distributed clutter environment. However, when a non-Gaussian distributed clutter with a long tail moves into the reference window, the rise of the CA-CFAR, the GO-CFAR and the OS-CFAR with incoherent integration reaches a peak of more than 3 orders of magnitude, and can not return to the pre-designed P_{fa} in Rayleigh noise situation. But the RQ nonparametric detector exhibits its inherent advantage in such situation, it can maintain constant false alarm rate even the distribution type of clutter changes to a different one.

Key words: radar; clutter; Weibull distribution; target detection; nonparametric; CFAR

1 引言

雷达目标恒虚警检测方法是决定雷达性能的一项关键技术,它不仅在雷达系统中广泛应用,在声纳、光学纤维警告前系统(OFPS)等领域也有着重要应用.尽管以单元平均(Cell Averaging, CA)为代表的雷达目标恒虚警检测技术自提出至今已过去了几十年,但新方法、新成果依然层出不穷.文献[1]基于尺度和功率不变分布给出了韦布尔背景中三种新的双参数 CFAR 检测器.文献[2]提出了一种加权幅度迭代(Weighted Amplitude Iteration, WAI) CFAR 检测方法,类似于文献[3,4]假定韦布尔分布的形状参数是已知的情形,该文分析了 WAI-CFAR 检测器在 Gamma 分布中的性能.文献[5]报道了一种专家系统(Expert System, ES) CFAR,它由美国空军研究实验室组织包括 Varshney 和 Rangaswamy 等著名学者参加的团队开发,并将它成功应用于 E-3 AWACS 空中预警雷达和 E-8 JSTARS 联合监视目标攻击雷达系统中,实验结果表明它减少了一个数量级的虚警,同时在复杂杂波环境中获得了检测性能的大幅改善.专家系统 ES-CFAR 采用单元平均(CA)、选大(Greatest Of, GO)、有序统计(Ordered Statistic, OS)^[6]、剔除平均(Trimmed Mean, TM)^[7]四种经典的恒虚警方法对雷达目标回波数据进行并行处理,再将各自的检测结果进行融合形成关于目标有无的最终判决.由此可见,经典的恒虚警方法在实践中有着强大的生命力.

还有另外一类非常重要的恒虚警检测方法就是非参数或非参量 CFAR 检测器,它的虚警概率不依赖于假定的杂波分布类型.它可以避免雷达目标检测器设计中遇到的假定杂波类型与实际杂波分布失配时,出现的检测器性能恶化的现象.文献[8]研究了经典的量化秩(Rank Quantization, RQ)非参数检测器在韦布尔分布均匀背景和多目标情况下的性能.但相对于 Rolhing 提出的衡量雷达目标恒虚警检测器性能的 3 种典型背景即均匀背景、多目标和杂波边缘情况^[6],在现有的文献中缺乏 RQ 非参数检测器在杂波边缘中虚警概率的解析表达式,缺乏 RQ 非参数检测器与经典的参量型检测器 CA, GO, OS 等在杂波边缘中虚警控制能力的比较.这对于非参量检测方法的理论研究来说,是不完善的、不全面的.本文将对这些问题进行研究,为雷达系统目标检测方案的设计和选择提供建议和帮助.

2 RQ 非参数检测器在杂波边缘中的数学模型

2.1 RQ 非参数检测器的检测原理

先介绍 RQ 非参数检测器的检测原理.为了保持与

文献[8]的延续性和阅读的方便,这里采取与文献[8]相一致的符号.考虑一个采用频率捷变技术的雷达系统沿某个方位发射了 M 个探测脉冲,回波信号经匹配滤波器和平方差检波器检波后,按照距离分辨单元实施采样,距离采样样本持续地送入一个移位寄存器,雷达目标自动检测就是采用这种参考滑窗技术.居于参考滑窗的中间单元为检测单元,两侧紧邻的为保护单元,为的是防止检测单元中的目标能量泄漏到参考单元中,参考滑窗中的其余 N 个单元为参考单元.对于第 i 个发射脉冲,检测单元中的回波样本为 x_i ,参考单元中的回波样本为 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}$ ($i = 1, \dots, M$).在 H_0 假设下,假定检测单元和参考单元中的回波样本间统计独立且同分布(Independent and Identically Distributed, IID);同时,由于采用了频率捷变技术,假定每次脉冲扫描间回波信号也是统计独立的.

对第 i 个发射脉冲来说,定义检测单元 x_i 与参考样本 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ 相比较的秩 r_i 为

$$r_i = \sum_{j=1}^N u(x_i - x_{ij}), (0 \leq r_i \leq N, i = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

这里 $u(t)$ 是单位阶跃信号,将本次扫描中的秩 r_i 与秩量化门限或第一量化门限 K 进行比较,得

$$B(r_i) = \begin{cases} 1, & r_i \geq K \\ 0, & r_i < K \end{cases} \quad (2)$$

对 $B(r_i)$ 进行二进制积累,再与二进制积累门限或第二量化门限 T 进行比较,得到 RQ 检测器关于目标有无的判决

$$Z_{RQ} = \sum_{i=1}^M B(r_i) = \begin{cases} Z_{RQ} \geq T, & \text{目标存在} \\ Z_{RQ} < T, & \text{无} \end{cases} \quad (3)$$

若 $Z_{RQ} \geq T$,判为目标出现;若 $Z_{RQ} < T$,判为目标不存在.文献[8]给出了 RQ 检测器的虚警概率计算公式

$$\begin{aligned} P_{fa}(T, K) &= \sum_{r=T}^M \binom{M}{r} \left(1 - \frac{K}{N+1}\right)^r \left(\frac{K}{N+1}\right)^{M-r} \\ &= \frac{1}{(N+1)^M} \sum_{r=T}^M \binom{M}{r} (N+1-K)^r K^{M-r} \end{aligned} \quad (4)$$

RQ 检测器的虚警概率与杂波分布类型无关,它的虚警概率 $P_{fa}(T, K)$ 除了取决于 M 和 N ,还取决于第一门限 K 和第二门限 T .对于设定的虚警概率 $\alpha = 10^{-5}$, RQ 检测器某一门限组合 (T, K) 给出的虚警概率是不能准确等于 $\alpha = 10^{-5}$ 的.为了便于检测器在相同虚警概率的约束条件下进行性能比较,需采用随机化处理技术.当 $N = 32, M = 12$ 时 RQ 检测器的虚警概率设定为 $\alpha = 10^{-5}$,随机化处理技术所采用的 $P(A)$ 数值如表 1 所示^[8]. $P(A)$ 的物理含义是 $r_i = K$ 时将检测器判为目标出现的事件归为虚警的概率.在下面对 RQ 检测器的性能分析中,也要采用相同的随机化处理.

表 1 RQ 检测器的检测门限 (T, K) 组合所采用随机化处理技术的 $P(A)$ 值, $N=32, M=12$, 虚警概率 $\alpha=10^{-5}$

| (T, K) | (6, 31) | (7, 30) | (8, 29) | (9, 27) | (10, 25) | (11, 23) | (12, 20) |
|----------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| $P(A)$ | 0.2874 | 0.3266 | 0.6430 | 0.1832 | 0.1022 | 0.3817 | 0.5398 |

2.2 RQ 非参数检测器在杂波边缘中的虚警概率

在实际雷达进行目标检测时,常会遇到参考滑窗内出现两类不同杂波类型的非均匀背景情形即杂波边缘.如参考滑窗内的杂波样本从弱杂波区向强杂波区过渡,典型的例子就是在降雨区边缘附近的情况.若检测单元位于强杂波区,由于参考滑窗内包含弱杂波样本,会导致检测门限过低而导致过量的虚警.这种情况违背了对检测器虚警概率保持恒定的约束条件,会导致后续数据处理设备过载.因此,本文对 RQ 检测器在杂波边缘中的虚警性能进行研究,并与典型的参量型检测器 CA-CFAR, OS-CFAR, GO-CFAR 的杂波边缘虚警控制能力进行比较,对雷达目标检测器的设计来说是有实际理论指导意义的.

本文将杂波边缘建模为参考滑窗内杂波功率呈现阶跃函数变化的情形,也就是说,假定有 L 个单元来自强杂波样本,余下的 $(N-L)$ 个杂波样本来自于弱杂波样本.虽然非参量检测器的虚警概率在均匀背景中与杂波统计分布类型无关,但在非均匀背景中它的虚警概率却与杂波的统计分布有关.本文假定杂波背景服从韦布尔分布,经平方率检波后弱杂波样本的累积分布函数(CDF)为

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\rho}\right)^{c/2}\right], x \geq 0 \quad (5)$$

其中, c 为形状参数, ρ 为尺度参数.强杂波样本的 CDF 为

$$\bar{F}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\gamma\rho}\right)^{c/2}\right], x \geq 0 \quad (6)$$

其中, γ 表示强、弱杂波的功率比.

若有 L 个强杂波样本进入参考滑窗,余下的 $(N-L)$ 个单元处于弱杂波区,且检测单元也处于强杂波区,那么对第 i 次扫描来说,检测单元的秩 $r_i \geq K$ 或 $B(r_i) = 1$ 的虚警概率为

$$P'_{fa}(K) = \int_0^\infty \sum_{\ell=K}^N \sum_{j=\max(0, \ell-L)}^{\min(\ell, N-L)} \binom{N-L}{j} \binom{L}{\ell-j} F^j(x) [1 - F(x)]^{N-L-j} \times \bar{F}^{\ell-j}(x) [1 - \bar{F}(x)]^{L-\ell+j} d\bar{F}(x) \quad (7)$$

对上述积分做变量代换 $y = \left(\frac{x}{\rho}\right)^{c/2}$, 得

$$P'_{fa}(K) = \frac{1}{\gamma^{c/2}} \int_0^\infty \sum_{\ell=K}^N \sum_{j=\max(0, \ell-L)}^{\min(\ell, N-L)} \binom{N-L}{j} \binom{L}{\ell-j} [1 - \exp(-y)]^j \times [\exp(-y)]^{N-L-j} \left[1 - \exp\left(-\frac{y}{\gamma^{c/2}}\right)\right]^{\ell-j} \left[\exp\left(-\frac{y}{\gamma^{c/2}}\right)\right]^{L-\ell+j} dy$$

$$\begin{aligned} & \times \exp\left(-\frac{y}{\gamma^{c/2}}\right) dy \\ & = \frac{1}{\gamma^{c/2}} \sum_{\ell=K}^N \sum_{j=\max(0, \ell-L)}^{\min(\ell, N-L)} \binom{N-L}{j} \binom{L}{\ell-j} \\ & \quad \sum_{\ell_1=0}^j \binom{j}{\ell_1} (-1)^{\ell_1} \times \sum_{j_1=0}^{\ell-j} \binom{\ell-j}{j_1} (-1)^{j_1} \\ & \times \int_0^\infty \exp\left[-\left(\ell_1 + N - L - j + \frac{j_1 + L - \ell + j + 1}{\gamma^{c/2}}\right)y\right] dy \\ & = \sum_{\ell=K}^N \sum_{j=\max(0, \ell-L)}^{\min(\ell, N-L)} \binom{N-L}{j} \binom{L}{\ell-j} \sum_{\ell_1=0}^j \binom{j}{\ell_1} (-1)^{\ell_1} \\ & \times \sum_{j_1=0}^{\ell-j} \binom{\ell-j}{j_1} (-1)^{j_1} \frac{1}{\gamma^{c/2}(\ell_1 + N - L - j) + j_1 + L - \ell + j + 1} \end{aligned} \quad (8)$$

为避免式(8)内层求和产生的误差积累,利用下面的组合恒等式^[4]

$$\sum_{\ell=0}^{\beta-1} \binom{\beta-1}{\ell} (-1)^\ell \frac{1}{\ell + \mu} = \frac{\Gamma(\mu)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\mu + \beta)} \quad (9)$$

对式(8)中的内层求和进行化简,得

$$P'_{fa}(K) = \sum_{\ell=K}^N \sum_{j=\max(0, \ell-L)}^{\min(\ell, N-L)} \binom{N-L}{j} \binom{L}{\ell-j} \sum_{\ell_1=0}^j \binom{j}{\ell_1} (-1)^{\ell_1} \times \frac{\Gamma[\gamma^{c/2}(\ell_1 + N - L - j) + L - \ell + j + 1] \Gamma[\ell - j + 1]}{\Gamma[\gamma^{c/2}(\ell_1 + N - L - j) + L + 2]} \quad (10)$$

由于采用了频率捷变技术,假定各次扫描间的样本是统计独立的,这样, RQ 检测器对 M 个扫描脉冲的单次检测结果 $P'_{fa}(K)$ 进行二进制积累,得 RQ 检测器在杂波边缘中的虚警概率为

$$P_{fa}(T, K) = \sum_{r=T}^M \binom{M}{r} (P'_{fa}(K))^r (1 - P'_{fa}(K))^{M-r} \quad (11)$$

若 RQ 检测器的检测单元位于弱杂波区,将式(10)中的强、弱杂波进行对换,并将强、弱杂波功率比 γ 以倒数代入,就会得到检测单元位于弱杂波区时 RQ 检测器在杂波边缘中虚警概率的计算公式.

3 性能分析和数值结果

3.1 RQ 非参数检测器在杂波边缘中的虚警性能分析

当杂波边缘进入参考滑窗,图 1 给出了 RQ 检测器的虚警概率 $P_{fa}(T, K)$ 随进入参考滑窗内强杂波样本数 L 的变化曲线, $N=32, M=12, c=2.0, \gamma=5\text{dB}$, 检测器设定的虚警概率为 $\alpha=10^{-5}$. 当检测单元未进入强杂波

区,即 $L \leq 16$, RQ 检测器的虚警概率会下降;当检测单元进入强杂波区,即 $L > 16$, RQ 检测器的虚警概率会上升,后一种情况更严重,因为它违背了对雷达目标检测器虚警概率恒定的要求.当检测单元和它左边的参考单元全部进入强杂波区,而检测单元右边的参考单元还未进入强杂波区时,检测器虚警概率的上升是最为严重的,称为虚警尖峰.图 1 中 RQ 检测器的虚警尖峰从低到高依次为 $P_{fa}(6, 31)$, $P_{fa}(7, 30)$, $P_{fa}(8, 29)$, $P_{fa}(9, 27)$ 的情形,而 $P_{fa}(12, 20)$, $P_{fa}(11, 23)$, $P_{fa}(10, 25)$ 的虚警尖峰接近.最低 $P_{fa}(6, 31)$ 的虚警尖峰为 3.54×10^{-4} , 最高 $P_{fa}(11, 23)$ 的虚警尖峰为 1.65×10^{-3} .可以看出采用高秩量化门限 K 的 RQ 检测器在杂波边缘的虚警控制性能要好于低秩量化门限 K 的情况.

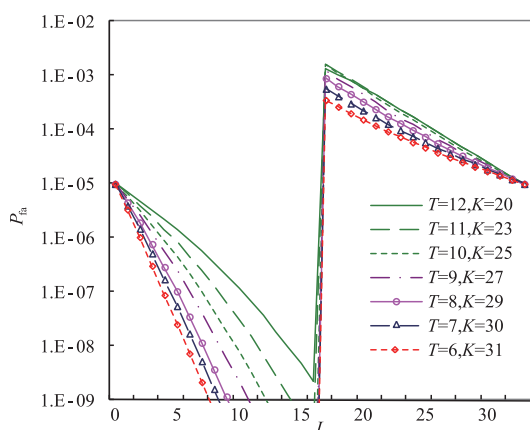


图1 RQ检测器的虚警概率 $P_{fa}(T, K)$ 随强杂波样本数 L 的变化曲线, $N=32, M=12, \gamma=5\text{dB}, c=2.0$

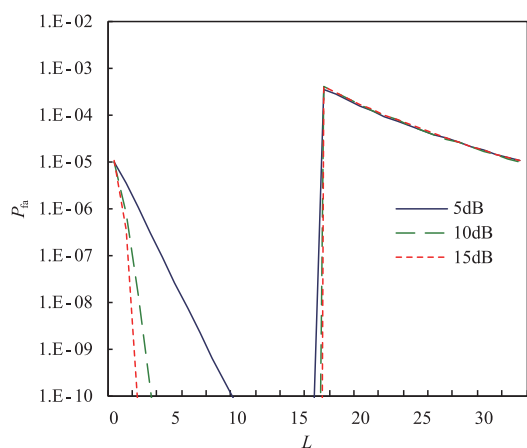


图2 RQ检测器的虚警概率 $P_{fa}(6, 31)$ 在不同杂波功率比 γ 的变化情况, $N=32, M=12, \gamma=5\text{dB}, 10\text{dB}, 15\text{dB}$

图 2 给出了 RQ 检测器 $P_{fa}(6, 31)$ 的虚警性能在不同杂波功率比 γ 的变化情况, 参数为 $N=32, M=12, c=2.0, \gamma=5\text{dB}, 10\text{dB}, 15\text{dB}, \alpha=10^{-5}$. 可以看出, 当 $L > 16$ 时 RQ 检测器的虚警概率在 $\gamma=5\text{dB}, 10\text{dB}, 15\text{dB}$ 情

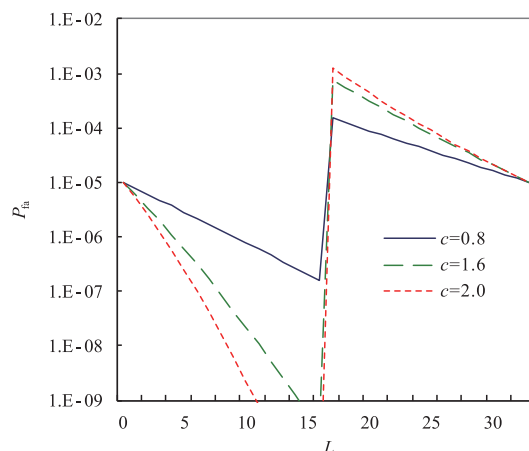


图3 RQ检测器的虚警概率 $P_{fa}(9, 27)$ 在不同形状参数 c 的变化情况, $N=32, M=12, c=2.0, 1.6, 0.8, 5\text{dB}, \alpha=10^{-5}$

况下的上升曲线接近, 这说明 RQ 检测器的虚警尖峰对杂波功率比 γ 大于 5dB 以后的变化不敏感. 图 3 给出了 RQ 检测器 $P_{fa}(9, 27)$ 的虚警性能在 $c=2.0, 1.6, 0.8$ 时的情况, $N=32, M=12, \gamma=5\text{dB}, \alpha=10^{-5}$. 可以看出, 在同样的强、弱杂波功率比 $\gamma=5\text{dB}$ 的情况下, 杂波的低形状参数 c 对应着低的虚警尖峰. 这主要是由于低形状参数 c 意味着杂波具有一些幅值较大的不规则样本, 而这些样本又具有稀疏性, 通过 RQ 检测器的秩量化处理和二进制积累, 可以抑制这些不规则样本导致的虚警.

3.2 RQ 检测器与非相干积累 CA, GO, OS 检测器的虚警性能比较

在雷达目标检测器方案的设计和选择中, 不仅要考虑非参量检测器与参量型检测器在均匀背景和多目标环境中的性能差别, 还需要清楚它们在杂波边缘中的性能优劣. 为了统一衡量它们的性能, 参量型检测器也考虑使用相同 $M=12$ 个脉冲, 滑窗长度也选用相同的参考单元数目 $N=32$. 参量型检测器考虑非相干积累 CA-CFAR, 非相干积累 GO-CFAR 和非相干积累 OS-CFAR, 它们先对 12 个统计独立脉冲的回波信号进行非相干积累, 再采用 CA, GO 和 OS 方法来设置检测门限, OS 方法的代表秩选取 $k=28$. 图 4 给出了 RQ 检测器 $P_{fa}(6, 31)$ 和非相干积累 CA, GO 和 OS 方法在杂波边缘中的虚警概率变化曲线, $N=32, M=12$. 在这里强、弱杂波均假定服从瑞利分布 $c=2.0$, 强、弱杂波功率比 $\gamma=5\text{dB}$. 可以看出, 非相干积累 CA 在杂波边缘的虚警上升最为严重, 上升了 3 个数量级, 虚警控制能力最强的是非相干积累 GO 检测器, RQ 非参数检测器接近于非相干积累 OS-CFAR 的虚警上升程度.

下面再考虑一种更接近实际的杂波边缘情形^[2], 即强杂波是长拖尾分布的非高斯杂波 ($c=1.2$), 而弱

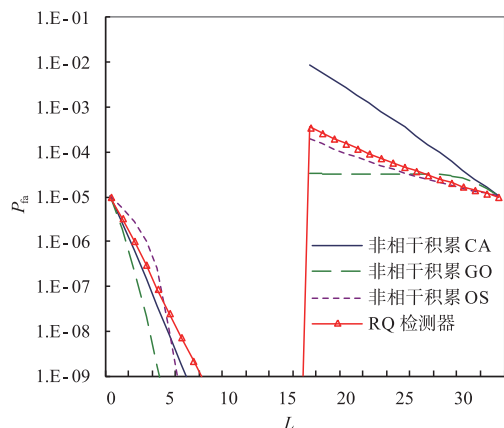


图4 RQ检测器的 $P_{fa}(6, 31)$ 与非相干积累CA, GO, OS方法在杂波边缘的虚警性能比较, $N=32, M=12, \gamma=5\text{dB}, c=2.0$

杂波是热噪声为主的瑞利分布情形($c=2.0$). 图5给出了这种情况下RQ检测器 $P_{fa}(6, 31)$ 和非相干积累CA, GO和OS($k=28$)方法在杂波边缘的虚警概率变化曲线, $N=32, M=12, \gamma=5\text{dB}$. 参量型检测器的初始虚警概率按照瑞利分布 $c=2.0$ 杂波背景进行设定. 可以看出, 当韦布尔分布 $c=1.2$ 的强杂波进入参考滑窗后, 参量型检测器—非相干积累CA, GO和OS方法的虚警尖峰出现了3个数量级以上的上升. 当参考滑窗完全进入韦布尔强杂波区后, 它们的虚警概率都不能回到原始设定的虚警概率 $\alpha=10^{-5}$. 但是RQ检测器显示出了非参量检测器的优势, 即当杂波背景的类型发生变化后, 它仍然可以维持虚警概率的恒定.

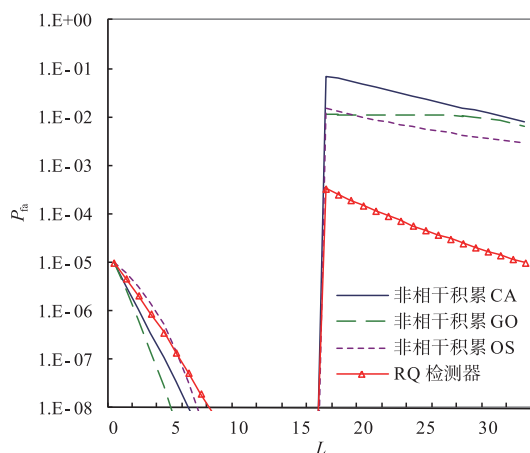


图5 RQ检测器 $P_{fa}(6, 31)$ 与非相干积累CA, GO, OS方法在杂波边缘的虚警性能比较, $N=32, M=12, \gamma=5\text{dB}, c=1.2$

3.3 RQ检测器与非相干积累CA, GO, OS方法的检测性能比较

文献[8]给出了RQ检测器在韦布尔分布均匀背景和强干扰目标(即干扰目标与杂波的功率比ICR趋于无穷大)情况下的检测概率解析表达式, 并给出了检

测性能的数值分析结果和曲线. 这里为了全面衡量RQ检测器的性能, 采用重要采样技术对RQ检测器与非相干积累CA, GO和OS检测方法在均匀背景、多目标环境中的检测性能做一比较. 但是, 与文献[8]不同的是, 在多目标情况下这里假定干扰目标的干杂比ICR与检测单元中目标的信杂比SCR相等.

图6给出了RQ检测器 $P_d(9, 27)$ 和最优检测、非相干积累CA, GO和OS($k=28$)方法在均匀背景中的检测概率变化曲线, 最优检测是指噪声背景参数已知的固定门限检测情形, 噪声背景考虑为 $c=2.0$ 即瑞利分布情形, $N=32, M=12$. 可以看出, 非相干积累CA, GO和OS($k=28$)方法的检测概率曲线几乎与最优检测重合, 这是因为参考单元数和脉冲积累个数足够大, 使得它们的性能逼近固定门限检测. 当 $P_d=0.5$ 时, RQ检测器 $P_d(9, 27)$ 相对于它们的恒虚警损失约为4dB.

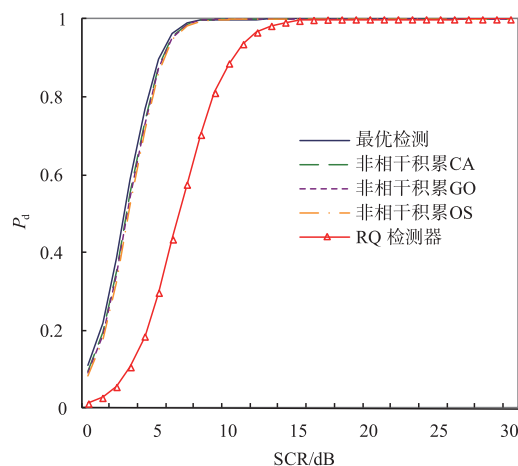


图6 RQ检测器的 $P_{fa}(9, 27)$ 与非相干积累CA, GO, OS方法在均匀背景中的检测性能比较, $N=32, M=12$

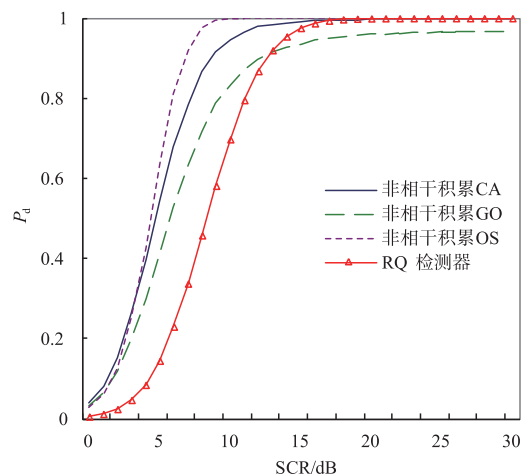


图7 RQ检测器的 $P_{fa}(9, 27)$ 与非相干积累CA, GO, OS方法在多目标(3, 1)环境中的检测性能比较, $N=32, M=12$

图 7 给出了 RQ 检测器 $P_d(9, 27)$ 与非相干积累 CA, GO 和 OS ($k = 28$) 方法在多目标环境 (3, 1) 中的检测概率变化曲线, 多目标环境 (3, 1) 是指有 3 个干扰目标进入前沿滑窗、1 个干扰目标进入后沿滑窗, $N = 32, M = 12, c = 2.0$. 这里假定干扰目标与杂波的干扰比 ICR 与检测单元中目标的信杂比 SCR 相等. 可以看出, 非相干积累 OS 方法在多目标环境中的检测性能最好, 体现了 OS 方法对多目标分辨能力强的优点, 当 $P_d = 0.5$ 时, RQ 检测器 $P_d(9, 27)$ 相对于非相干积累 OS 方法的恒虚警损失接近 4dB. RQ 检测器相比非相干积累 CA, GO 和 OS 方法所产生的恒虚警损失, 则是 RQ 检测器在杂波边缘中的虚警性能优势所付出的代价.

4 结论

在对空、对海搜索的警戒雷达或未制导雷达对飞机、舰船目标的检测中, 常会遇到雷达杂波从弱杂波区向强杂波区过渡的情况, 即杂波边缘. 在这种情况下, 雷达目标检测器会出现过量的虚警. 通常人们会选用选大 (GO) 恒虚警检测器来克服杂波边缘的虚警概率上升问题. 本文研究了量化秩 (RQ) 非参数检测器在杂波边缘中的性能, 给出了 RQ 检测器在杂波边缘虚警概率的解析表达式, 并比较了它与典型参量型恒虚警检测器在杂波边缘的虚警控制能力. 可以看出, 在强、弱杂波均为瑞利分布的情况下, 选大 (GO) 方法可以有效控制虚警概率的上升, 采用高秩量化门限的 RQ 检测器虚警控制能力要优于低秩量化门限的情况, RQ 检测器 $P_{fa}(6, 31)$ 与非相干积累 OS (28) 方法的虚警控制能力接近. 但是当强杂波为长拖尾分布的非高斯杂波时, 非相干积累 CA, GO 和 OS 参量型检测方法的虚警概率都产生了 3 个数量级以上的上升, 且不能回到原始设定在瑞利杂波背景的虚警概率 $\alpha = 10^{-5}$. 而 RQ 检测器显示出了非参量检测器的优势, 即当杂波背景分布类型发生变化后, 它仍然可以保持虚警概率的恒定. 由于雷达杂波参数随时间、位置而改变, 且其统计分布类型也会受到一些非可控因素而改变, 雷达系统的设计就会面临参量型 CFAR 检测器与非参数检测方案间的选择问题. 本文所得出的结论可以为岸基或舰载警戒雷达、未制导雷达等雷达系统目标检测方案的选择和设计提供理论依据和帮助.

参考文献

- [1] Weinberg G V. Development of non-coherent CFAR detection processes in Weibull background [J]. Digital Signal processing, April 2018, 75: 96 – 106.
- [2] Zhou W, Xie J H, Li G P and Du Y H. Robust CFAR detector with weighted amplitude iteration in nonhomogeneous sea clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 57(3): 1520 – 1535.
- [3] Meng X W. Performance analysis of Nitzberg's clutter map for Weibull distribution [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(3): 916 – 922.
- [4] Meng X W. Performance analysis of OS-CFAR with binary integration for Weibull background [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1357 – 1366.
- [5] Wicks M C, and Baldygo W J. Expert system CFAR algorithm development, experimental demonstration, and transition to airborne radar systems [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2017, 32(9): 40 – 47.
- [6] Rohling, H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple-target situations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(4): 608 – 621.
- [7] Gandhi P P, and Kassam S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(4): 427 – 445.
- [8] 孟祥伟. 韦布尔杂波下非参数量化秩检测器的性能 [J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2030 – 2034.
Meng Xiang-wei. Performance of rank quantization (RQ) nonparametric detector in Weibull background [J]. ACTA Electronica Sinica, 2009, 37(9): 2030 – 2034. (in Chinese)

作者简介



孟祥伟 男, 1966 年生于陕西陇县, 现为烟台南山学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号检测理论.
E-mail: mengxw163@sina.com