

一种新的基于剔除平均的最大选择恒虚警检测器¹

何 友 孟祥伟

(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

摘 要 本文基于剔除平均(TM)提出了一种新的最大选择(GO)恒虚警检测器,它的前、后沿滑窗均采用TM来产生局部估计,再选择两者之中的最大值作为检测器对杂波功率水平的估计,去设置自适应检测门限,并应用了何友(1994)提出的自动筛选技术,分析结果表明,它在均匀背景及多目标和杂波边缘引起的非均匀背景中的性能,均比GOSGO或OSGO获得了改善,并且它的样本排序时间还不到OS的一半。一些流行的恒虚警方法如GO、GOSGO或OSGO、CMGO可看作是TMGO的特例。

关键词 雷达,检测,恒虚警率,有序统计

中图分类号 TN951

1 引 言

在雷达自动目标检测中,常采用恒虚警率(CFAR)技术。经典的单元平均(CA)恒虚警检测器,在均匀背景中虽然能够提供最小的检测损失,但在参考滑窗内出现杂波边缘时,它的虚警率会过分上升,并且在多目标环境中,它的检测概率会大大降低。有序统计(OS)^[1]方法具有容纳干扰目标的能力,但这种方法存在着样本排序时间过长的缺点。为此,文献[2]基于有序统计提出了有序统计最大选择(OSGO)方法,而文献[3]又提出了广义有序统计最大选择(GOSGO)方法和一种自动筛选技术,OSGO可看作是它的特例,采用最大选择逻辑的优势在于它能提供好的杂波边缘保护能力。作为对OS的推广和一般化,文献[4]提出了剔除平均(TM)方法,本文基于剔除平均提出了剔除平均最大选择(TMGO)恒虚警检测器,这样一来,一些流行的恒虚警方法如GO、GOSGO或OSGO、CMGO^[5]可看作是它的特例,在某种程度上, TMGO又获得了优于它们的性能。

2 检测原理描述

TMGO-CFAR检测器的原理框图如图1所示,图中 V 是检测单元,两侧是参考单元,滑窗长度 $R = M + N$, M 、 N 分别为前、后沿参考滑窗长度,图中的停止移位控制器和参考单元移位寄存器一起实现自动筛选功能,即将检测为目标信号的样本剔除掉,使之不进入后沿滑窗。自适应判决准则为

$$v \begin{cases} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{cases} TZ, \quad (1)$$

其中 H_1 表示有目标, H_0 表示没有目标, Z 是干扰功率水平估计, T 是门限参数, v 代表检测单元采样值。

¹ 1997-05-22 收到, 1999-02-22 定稿

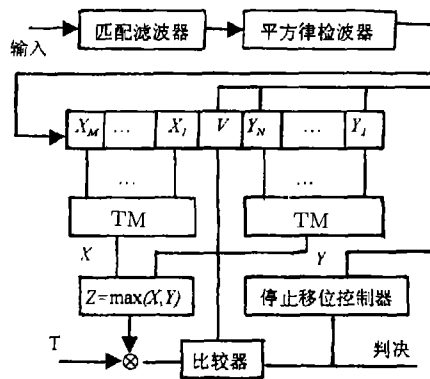


图1 TMGO-CFAR 检测器原理框图

假设背景噪声检测包络服从瑞利分布, 本文仅考虑单脉冲平方检测, 目标模型为 Swerling II 型, 检测单元和各个参考单元的观测是统计独立的, 在均匀背景中, 它们具有同分布。检测单元的假设检验对为指数分布:

$$v \sim \begin{cases} f_0(v) = (1/\mu) \exp(-v/\mu), & H_0, \\ f_1(v) = [1/(b\mu)] \exp[-v/(b\mu)], & H_1, \end{cases} \quad v > 0; \quad (2)$$

其中 $b = 1 + \lambda$, λ 是单脉冲平均信噪比, μ 代表噪声强度平均值。

TMGO-CFAR 检测器的前、后沿滑窗均采用剔除平均 (TM) 方法估计杂波功率水平, 对于前沿滑窗来说, 先剔除掉最大的 M_2 个和最小的 M_1 个样本, 对剩下的 $M - M_2 - M_1$ 个样本求平均, 作为前沿滑窗对杂波功率水平的估计:

$$X = \frac{1}{M - M_2 - M_1} \sum_{i=M_1+1}^{M-M_2} x_{(i)}, \quad (3)$$

其中 $x_{(i)}$ 为前沿滑窗的第 i 个有序样本。尽管参考单元变量 $x_i (i \in \bar{M})$ 是统计独立的, 但有序统计量 $x_{(i)} (i \in \bar{M})$ 并不统计独立, 不能简单地对 $x_{(i)}$ 的概率密度函数 (pdf) 进行卷积来求 X 的 pdf。故引入辅助变量^[6]:

$$w'_i = (M + 1 - i)[x_{(i)} - x_{(i-1)}], \quad 1 \leq i \leq M, \quad x_{(0)} = 0. \quad (4)$$

它们是统计独立的且有相同的概率密度函数 $f(t) = (1/\mu) \exp(-t/\mu)U(t)$, 通过简单的代数运算, 便有

$$X = \sum_{i=1}^{M-M_2} \beta'_i w'_i, \quad \beta'_i = \begin{cases} \frac{1}{(M+1-i)}, & i = 1, \dots, M_1+1; \\ \frac{(M-M_2-i+1)}{(M+1-i)(M-M_2-M_1)}, & i = M_1+2, \dots, M-M_2; \end{cases} \quad (5)$$

故 X 的矩产生函数 (mgf) 为

$$\Phi_X(u) = \prod_{i=1}^{M-M_2} \frac{c'_i}{\mu u + c'_i}, \quad c'_i = 1/\beta'_i. \quad (6)$$

矩产生函数定义为 $\Phi_X(u) = \int_0^\infty f_x(t)e^{-ut}dt$, $f_x(t)$ 为 X 的概率密度函数。将互不相同的 c'_i 记为 $s'_i (i = 1, \dots, m')$, r'_i 为 s'_i 的重数, 有 $\sum_{i=1}^{m'} r'_i = M - M_2$, (6) 式变为

$$\Phi_X(u) = \prod_{i=1}^{m'} \left(\frac{s'_i}{\mu u + s'_i} \right)^{r'_i}. \quad (7)$$

对上式取拉普拉斯反变换, 产生 X 的概率密度函数 (pdf)

$$f_X(t) = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{r'_i} \frac{a'_{ij}}{\mu} \left(\frac{t}{\mu} \right)^{j-1} e^{-s'_i t/\mu} U(t),$$

$$a'_{ij} = \frac{1}{(j-1)!(r'_i - j)!} \left\{ \frac{d^{r'_i - j}}{du^{r'_i - j}} [\Phi_X(u)(\mu u + s'_i)^{r'_i}] \right\}_{u = -s'_i/\mu} \quad (8)$$

X 的累积分布函数 (cdf) 为

$$F_X(t) = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{r'_i} a'_{ij} \frac{\Gamma(j)}{(s'_i)^j} \left[1 - e^{-s'_i t/\mu} \sum_{k=0}^{j-1} \frac{(s'_i t/\mu)^k}{k!} \right] U(t). \quad (9)$$

对于后沿滑窗来说, 先剔除掉最大的 N_2 个和最小的 N_1 个样本, 对剩下的 $N - N_2 - N_1$ 个样本求平均, 作为后沿滑窗对杂波功率水平的估计:

$$Y = \frac{1}{N - N_2 - N_1} \sum_{j=N_1+1}^{N-N_2} y_{(j)}. \quad (10)$$

类似地, 可求得 Y 的矩产生函数 (mgf)

$$\Phi_Y(u) = \prod_{j=1}^{N-N_2} \frac{c''_j}{\mu u + c''_j},$$

$$c''_j = \begin{cases} (N+1-j), & j = 1, \dots, N_1+1; \\ \frac{(N+1-j)(N-N_2-N_1)}{(N-N_2-j+1)}, & j = N_1+2, \dots, N-N_2. \end{cases} \quad (11)$$

将互不相同的 c''_j 记为 $s''_j (j = 1, \dots, n')$, r''_j 为 s''_j 的重数, 有 $\sum_{j=1}^{n'} r''_j = N - N_2$, (11) 式变为

$$\Phi_Y(u) = \prod_{j=1}^{n'} \left(\frac{s''_j}{\mu u + s''_j} \right)^{r''_j} \quad (12)$$

类似地, 可得 Y 的概率密度函数 (pdf) 和累积分布函数 (cdf) 分别为

$$f_Y(t) = \sum_{e=1}^{n'} \sum_{f=1}^{r''_e} \frac{a''_{ef}}{\mu} \left(\frac{t}{\mu} \right)^{f-1} e^{-s''_e t/\mu} U(t),$$

$$F_Y(t) = \sum_{e=1}^{n'} \sum_{f=1}^{r''_e} a''_{ef} \frac{\Gamma(f)}{(s''_e)^f} \left[1 - e^{-s''_e t/\mu} \sum_{g=0}^{f-1} \frac{(s''_e t/\mu)^g}{g!} \right] U(t), \quad (13)$$

式中

$$a''_{ef} = \frac{1}{(f-1)!(r''_e - f)!} \left\{ \frac{d^{r''_e - f}}{du^{r''_e - f}} \left[\Phi_Y(u)(\mu u + s''_e)^{r''_e} \right] \right\}_{u=-s''_e/\mu}. \quad (14)$$

TMGO-CFAR 检测器选取两个局部估计的最大值作为检测器对杂波功率水平的估计, 即

$$Z = \max(X, Y). \quad (15)$$

Z 的 pdf 为

$$f_Z(t) = f_X(t)F_Y(t) + f_Y(t)F_X(t), \quad (16)$$

其中, $f_X(t)$, $F_X(t)$, $f_Y(t)$, $F_Y(t)$ 分别为 X 和 Y 的 pdf 和 cdf.

3 TMGO-CFAR 检测器在均匀背景中的性能分析

设置门限的统计量 Z 是个随机变量, 检测器的性能由其平均检测概率和平均虚警概率决定, 平均虚警概率和平均检测概率分别为

$$P_{fa} = E_z\{\Pr[V > TZ|H_0]\} = \Phi_Z(u)|_{u=T/\mu}, P_d = E_z\{\Pr[V > TZ|H_1]\} = \Phi_Z(u)|_{u=t/b\mu}. \quad (17)$$

计算 P_{fa} 和 P_d 的关键就在于求 Z 的矩产生函数 $\Phi_Z(u)$. 由 (16) 式, 得

$$\begin{aligned} \Phi_Z(u) = & \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{r'_i} \sum_{e=1}^{n'} \sum_{f=1}^{r''_e} a'_{ij} a''_{ef} \left\{ \frac{\Gamma(f)}{(s''_e)^f} \left[\frac{\Gamma(j)}{(\mu u + s'_i)^j} - \sum_{g=0}^{f-1} \frac{(s''_e)^g}{g!} \frac{\Gamma(j+g)}{(\mu u + s'_i + s''_e)^{j+g}} \right] \right. \\ & \left. + \frac{\Gamma(j)}{(s'_i)^j} \left[\frac{\Gamma(f)}{(\mu u + s''_e)^f} - \sum_{k=0}^{j-1} \frac{(s'_i)^k}{k!} \frac{\Gamma(f+k)}{(\mu u + s'_i + s''_e)^{f+k}} \right] \right\}. \quad (18) \end{aligned}$$

将 (18) 式代入 (17) 式, 即可分别求出 TMGO-CFAR 检测器的 P_{fa} 和 P_d 解析表达式. 可求得的 TMGO-CFAR 检测器平均判决门限 $\text{ADT}^{[1]}$ 的解析表达式:

$$\begin{aligned} \text{ADT}_{\text{TMGO}} = & T \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{r'_i} \sum_{e=1}^{n'} \sum_{f=1}^{r''_e} a'_{ij} a''_{ef} \left\{ \frac{\Gamma(f)}{(s''_e)^f} \left[\frac{\Gamma(j+1)}{(s'_i)^{j+1}} - \sum_{g=0}^{f-1} \frac{(s''_e)^g}{g!} \frac{\Gamma(j+g+1)}{(s'_i + s''_e)^{j+g+1}} \right] \right. \\ & \left. + \frac{\Gamma(j)}{(s'_i)^j} \left[\frac{\Gamma(f+1)}{(s''_e)^{f+1}} - \sum_{k=0}^{j-1} \frac{(s'_i)^k}{k!} \frac{\Gamma(f+k+1)}{(s'_i + s''_e)^{f+k+1}} \right] \right\}. \quad (19) \end{aligned}$$

在均匀背景中, 对于任意给定的 P_{fa} , 解 (17) 式可得 TMGO 的门限参数 T . 对于 $P_{fa} = 10^{-6}$, 前、后沿滑窗长度 $M = N = 10$ 时, 表 1 和表 2 分别给出了前、后沿滑窗剔除平均 (TM) 同时从高端剔 ($M_1 = N_1 = 0$, $M_2 = N_2$ 增加) 和同时从低端剔 ($M_2 = N_2 = 2$, $M_1 = N_1$ 增加) 时, 门限参数 T 和平均判决门限 ADT 变化的部分数值结果. 可以看出, 随着高有序样本的减少, TMGO 的 ADT 是逐渐增加的, 而逐渐剔除低有序样本, TMGO 的 ADT 并不直接上升, 这是因为高有序样本的方差小, 而低有序样本的方差大的缘故. 对于 $P_{fa} = 10^{-6}$, 前、后沿滑窗长度 $M = N = 10$ 时, TMGO 在 $M_1 = N_1 = 4$, $M_2 = N_2 = 2$ 时的平均判决门限 $\text{ADT}=23.50$, 而 GOSGO 在 $k = l = 8$ 时的 ADT 值为 24.53, 这时它们具有相同的抗干扰目标能力, 故 TMGO-CFAR 在均匀背景中的性能是优于 GOSGO 或 OSGO 的.

表 1 TMGO 的 T 和 ADT 随 $M_2(N_2)$ 变化的情况

$M_2(N_2)$	2	3	4	5	6	7
T	31.06	39.95	53.54	75.49	116.6	216.4
ADT	23.98	25.78	28.85	33.64	42.24	61.89

表 2 TMGO 的 T 和 ADT 随 $M_1(N_1)$ 变化的情况

$M_1(N_1)$	2	3	4	5	6	7
T	24.45	21.84	19.51	17.49	15.70	14.18
ADT	23.63	23.56	23.50	23.59	23.85	24.53

4 TMGO-CFAR 检测器在多目标情况下的性能分析

这里仅分析强干扰目标的影响, 即假定干扰与噪声功率比很大, 干扰目标的回波总是占据有序统计量的最高位置。当左边干扰目标的数目 IL 小于或等于 M_2 , 右边干扰目标的数目 IR 小于或等于 N_2 时, 它们所产生的效果相当于减少了有序统计参考单元的数目, 可以通过用 $(M-IL)$, $(N-IR)$, (M_2-IL) , (N_2-IR) 代替前、后沿滑窗数学模型中的参数 M, N, M_2, N_2 来获得 TMGO 在多目标环境中的检测性能, 对弱干扰目标, 检测损失将变小。表 3 给出了在 Swerling II 型目标条件下, TMGO 和 GOSGO 检测器在出现多目标时的 CFAR 损失, 可看出, TMGO 在均匀背景和多目标环境中的性能均比 GOSGO 有所改善。

表 3 TMGO 和 GOSGO 检测器在多目标情况下的 CFAR 损失 (dB), $P_{fa} = 10^{-6}, P_d = 0.5$

IL, IR	0, 0	1, 0	1, 1	2, 0	2, 1	2, 2	3, 0	3, 1	3, 2
TMGO	2.449	2.770	3.259	3.309	3.660	4.383	4.328	4.506	4.948
GOSGO	2.621	2.950	3.655	3.567	4.081	5.253	4.906	5.159	5.898

TMGO: $M = N = 10, M_1 = 3, M_2 = 3, N_1 = 3, N_2 = 2$ GOSGO: $M = N = 10, k = 7, l = 8$

5 TMGO-CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能分析

在杂波强度发生急剧变化, 即出现杂波边缘的非均匀背景时, 若检测单元处于弱杂波区, 检测器的检测能力会降低; 若检测单元处于强杂波区, 虚警概率则会上升。后一种情况的危害性更大, 因为它严重损害了对检测器恒虚警率的要求。当强杂波区从前沿滑窗进入, 检测单元也进入强杂波区, 而后沿滑窗仍处于弱杂波区时, 虚警率上升最为严重, 是虚警率上升的峰值, 称之为虚警尖峰, 并以此衡量 CFAR 检测器在出现杂波边缘时虚警率上升的程度。若弱杂波服从强度参数为 μ 的分布, 而强杂波服从强度参数为 μ' 的分布, 定义杂波强度比为 $\gamma = \mu'/\mu$, 则虚警尖峰的计算公式为

$$P_{fa} = \int_0^{\infty} f_z(z) \left[\int_{Tz}^{\infty} \frac{1}{\mu'} \exp\left(-\frac{x}{\mu'}\right) dx \right] dz = \int_0^{\infty} f_z(z) \exp\left(-\frac{Tz}{\mu'}\right) dz, \quad (20)$$

T 为均匀背景中预先设置好的门限参数, $f_z(z)$ 仍通过 (16) 式来求, 但 $f_x(z), F_X(z)$ 为强度

参数 μ' 的分布, $f_Y(z)$, $F_Y(z)$ 为强度参数 μ 的分布, 于是

$$P_{fa} = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{r'_i} \sum_{e=1}^{n'} \sum_{f=1}^{r''_e} a'_{ij} a''_{ef} \left\{ \frac{\Gamma(f)}{(s''_e)^f} \left[\frac{\Gamma(j)}{(T + s'_i)^j} - \sum_{g=0}^{j-1} \frac{(\gamma s''_e)^g}{g!} \frac{\Gamma(j+g)}{(T + s'_i + \gamma s''_e)^{j+g}} \right] + \frac{\Gamma(j)}{(s'_i)^j} \left[\frac{\Gamma(f)}{(T/\gamma + s''_e)^f} - \sum_{k=0}^{j-1} \frac{(s'_i/\gamma)^k}{k!} \frac{\Gamma(f+k)}{(T/\gamma + s'_i/\gamma + s''_e)^{f+k}} \right] \right\}. \quad (21)$$

在前、后沿滑窗长度 $M = N = 10$, 杂波强度比 $\gamma = 15\text{dB}$ 时, 图 2 给出了 TMGO-CFAR 检测器前、后沿滑窗同时从高端剔 ($M_1 = N_1 = 2$) 时虚警尖峰随 M_2 和 N_2 变化的情况。图 3 给出了前、后沿滑窗同时从低端剔 ($M_2 = N_2 = 2$) 时虚警尖峰随 M_1 和 N_1 变化的情况。从图中可以看出, M_2 增大, 虚警尖峰升高, N_2 增大, 虚警尖峰降低, M_1 增大, 虚警尖峰降低, N_1 增大, 虚警尖峰升高, 这是由于高有序样本对杂波强度的变化反应大, 而低有序样本对杂波强度的变化反应小的缘故。对于前、后沿滑窗长度 $M = N = 10$, 杂波强度比为 $\gamma=15\text{dB}$ 时, 并考虑检测器有相同的抗干扰目标能力, 表 4 给出了 TMGO 和 GOSGO 的门限参数 T 和虚警尖峰的大小。从表 4 中的情况来看, 通过合适的参数选择, TMGO 可以获得比 GOSGO 或 OSGO 低的虚警尖峰。

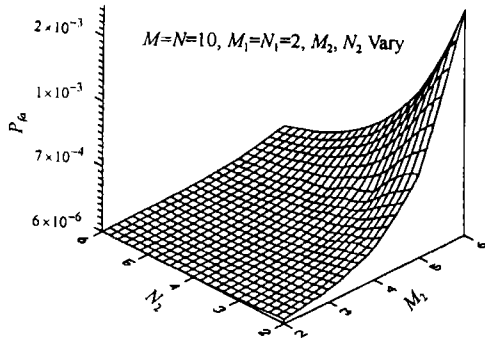


图 2 虚警尖峰随 M_2 和 N_2 变化的情况

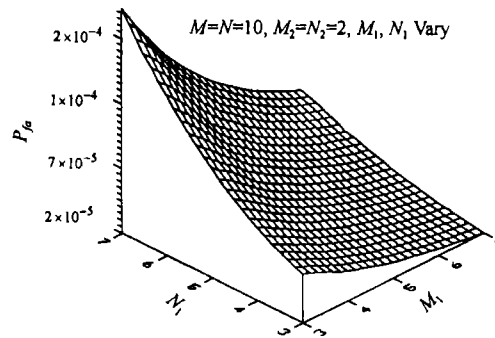


图 3 虚警尖峰随 M_1 和 N_1 变化的情况

表 4 $\gamma = 15\text{dB}$ 时 TMGO 和 GOSGO 检测器虚警率 P_{fa} 上升程度的比较

CFAR 检测器	$P_{fa} = 10^{-6}$ 时的门限参数 T	虚警率 P_{fa} 上升的峰值
TMGO	19.2485 ($M_2 = N_2 = 2, M_1 = 6, N_1 = 2$)	1.7087×10^{-5}
GOSGO	14.1772 ($k = l = 8$)	5.7064×10^{-5}

5 结 论

本文基于剔除平均 (TM) 提出了一种新的最大选择恒虚警检测器 (TMGO), 分析结果表明, TMGO 在均匀背景和多目标和杂波边缘引起的非均匀背景中的性能, 均比 GOSGO 或 OSGO 获得了改善。它也是一种比较容易实现的 CFAR 方案, 它的样本排序时间还不到 OS 的一半。TMGO 采用了文献 [3] 提出的自动筛选技术, 增强了它的抗干扰目标能力, 参数的选择也有较大的自由度。当 $M_1 = M_2 = 0, N_1 = N_2 = 0$ 时, TMGO 退化为 GO; 当 $M_2 = M - M_1 - 1, N_2 = N - N_1 - 1$ 时, TMGO 退化为 GOSGO 或 OSGO; 当 $M_1 = N_1 = 0$ 时, TMGO 退化

为 CMGO^[5]。当检测器的有关参数改变时, 检测器的性能还要有些局部变化, 这说明检测器对不同环境有其适应性, 要根据所处的实际环境采用具体的实施方案。这种检测器在韦布和对数正态背景及杂波样本相关情况下的性能还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. *IEEE Trans. on AES*, 1983, AES-19(4): 608-621.
- [2] Elias-Fuste A R, De Mercado M G, Davo E R. Analysis of some modified order statistics CFAR: OSGO and OSSO CFAR. *IEEE Trans. on AES*, 1990, AES-26(1): 197-202.
- [3] He You. Performance of some generalised modified order statistics CFAR detectors with automatic censoring technique in multiple situations. *IEE Proc. -Radar, Sonar Navig.*, 1994, 141(4): 205-212.
- [4] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background. *IEEE Trans. on AES*, 1988, AES-24(4): 427-445.
- [5] Willson S L. Two CFAR algorithms for interfering targets and nonhomogeneous clutter. *IEEE Trans. on AES*, 1993, AES-29(1): 57-72.
- [6] David H. *Order Statistics*. New York: Wiley, 1981.
- [7] 孟祥伟, 何友. 最小选择恒虚警检测器的统一模型——TMSO. *仪器仪表学报*, 1997, 18(5): 481-485.
- [8] 孟祥伟, 何友. 基于准最佳加权有序统计的最大选择 CFAR 检测算法. *电子学报*, 1997, 25(12): 74-78.

A NEW GREATEST OF SELECTION CFAR DETECTOR BASED ON TRIMMED MEAN

He You Meng Xiangwei

(Dept. of Electron. Eng., Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001)

Abstract A new greatest of selection CFAR detector (TMGO) based on trimmed mean (TM) is proposed in this paper. It takes the greatest value of two local estimations created by leading and lagging reference window which apply TM method as a noise power estimation, and it also uses the automatic censoring technique proposed by He You (1994). It is shown that the detection performance of TMGO is superior to that of GOSGO or OSGO in both homogeneous background and nonhomogeneous environment caused by strong interfering targets and clutter edges, while the sample sorting time of TMGO is less than a half of that of OS. Some current CFAR algorithms such as GO, GOSGO or OSGO, CMGO becomes the special cases of TMGO.

Key words Radar, Detection, CFAR, Ordered Statistics

何 友: 男, 1956 年生, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向有: 雷达自适应检测方法, 多目标跟踪, 多传感器信息融合, 火炮射表编制及其数据处理等。

孟祥伟: 男, 1966 年生, 讲师, 主要研究方向有: 雷达自适应检测方法, 信号理论。