两种改进的适用于多目标情况的恒虚警检测算法 [1]

孟祥伟　　何　友

(海军航空工程学院电子工程系　烟台　264001)

摘　要　本文基于筛选平均 (CM) 和无偏筛选平均 (UCM) 提出了两种改进的恒虚警检测器——MCM-CFAR 和 MUCM-CFAR，并应用了何友 (1994) 提出的自动筛选技术. 在 Swerling II 型目标假设下，并考虑瑞利分布杂波和单脉冲检测情形，本文推导出了 MCM-CFAR 和 MUCM-CFAR 检测器的 P_{fa}、P_d 和平均判决门限 (ADT) 的解析表达式，并与其它方案进行了比较. 分析结果表明，它们在均匀背景和多目标环境中的性能均明显优于 GOSCA 和 OS；当 IL=4，IR=2 时，MCM-CFAR 比 OS 改善了 2dB，MUCM-CFAR 也比 OS 改善了 1.5dB；MCM 的性能略优于 CM，MUCM 与 UCM 接近，但它们的样本排序时间不足 CM、UCM 和 OS 的一半，便于工程实现.

关键词　雷达，检测，恒虚警率，有序统计

中图号　TN957, TN911.7

1　引　言

经典的单元平均 (CA) 法对参考滑窗中的杂波样本取平均作为对杂波强度的估计，若参考滑窗内落入外来干扰目标时，CA 检测器的性能会严重恶化. 为了解决这个问题，其它一些恒虚警方法，如筛选平均 (CM)[1]、有序统计 (OS)[2]、剔除平均 (TM)[3] 和广义有序统计单元平均 (GOSCA)[4] 等应运而生. 本文基于 CM 和无偏筛选平均 (UCM)[5] 提出了两种新的恒虚警检测器 — 改进的 CM(MCM-CFAR) 和改进的 UCM(MUCM-CFAR)，并应用了文献 [4] 提出的自动筛选技术. 在 Swerling II 型目标假设下，并考虑瑞利分布杂波和单脉冲检测情形，本文推导出了 MCM-CFAR 和 MUCM-CFAR 检测器的 P_{fa}、P_d 和平均判决门限 (ADT) 的解析表达式，并与其它方案进行了比较。

2　MCM-CFAR 检测器及其在均匀背景中的性能

MCM-CFAR 检测器采用了子滑窗技术，将检测单元两侧的杂波样本分为两组分别称为前、后沿滑窗，它们均采用 CM 方法去产生两个局部估计 X、Y，检测器将二者的和 Z 作为对杂波功率水平的全局估计，按虚警率要求给它乘以门限参数 T，去设置自适应检测门限，若检测单元的回波超过它，判为有目标，反之则无.

本文假设背景噪声检测包络服从瑞利分布，且仅考虑单脉冲平方检测，目标模型为 Swerling

[1] 1996-02-08 收到，1996-11-22 定稿

II 型。检测单元的二元假设检验对为

$$v \sim \begin{cases} f_0(v) = \dfrac{1}{\mu}\exp\left(-\dfrac{v}{\mu}\right), & H_0; \\ f_1(v) = \dfrac{1}{b\mu}\exp\left(-\dfrac{v}{b\mu}\right), & H_1. \end{cases} \quad (v > 0), \tag{1}$$

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； H_1 表示有目标， H_0 表示没有目标。由于这里考虑的是均匀环境和多目标情形，不失一般性，可令 $\mu = 1$ 。假设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，它们具有相同的统计分布。

MCM-CFAR 检测器的前、后沿滑窗均采用 CM 方法产生两个对杂波功率水平的估计量 X 和 Y ，即先筛除掉有可能成为干扰目标的最大几个样本，对剩下的样本求平均

$$X = \frac{1}{M - M_1}\sum_{i=1}^{M-M_1} x_{(i)}, \qquad Y = \frac{1}{N - N_1}\sum_{j=1}^{N-N_1} y_{(j)}. \tag{2}$$

$x_{(i)}$ 和 $y_{(j)}$ 分别为前、后沿滑窗对杂波样本排序得到的有序样本。X 和 Y 的矩产生函数 (mgf)[6] 分别为

$$\Phi_X(u) = \prod_{i=1}^{M-M_1} \frac{c_i'}{u + c_i'}, \qquad \Phi_Y(u) = \prod_{j=1}^{N-N_1} \frac{c_j''}{u + c_j''}, \tag{3}$$

其中

$$c_i' = \frac{(M - i + 1)(M - M_1)}{M - M_1 - i + 1}, \qquad c_j'' = \frac{(N - j + 1)(N - N_1)}{N - N_1 - j + 1}. \tag{4}$$

MCM-CFAR 检测器取前、后沿滑窗两个局部估计的和作为检测器对杂波功率水平的估计

$$Z = X + Y. \tag{5}$$

Z 的 mgf 为

$$\Phi_Z(u) = \Phi_X(u)\Phi_Y(u). \tag{6}$$

检测器的平均虚警概率和平均检测概率由 Z 的 mgf 决定 [6]，即

$$P_{fa} = \Phi_Z(u)|_{u=T}, \qquad P_d = \Phi_Z(u)|_{u=T/b}. \tag{7}$$

将 (6) 式代入上式，可得 MCM-CFAR 检测器的平均虚警概率和平均检测概率的解析表达式。

MCM-CFAR 检测器的平均判决门限 (ADT) 的解析表达式为

$$\mathrm{ADT}_{\text{MCM-CFAR}} = T\left\{\sum_{i=1}^{M-M_1}\frac{1}{c_i'} + \sum_{j=1}^{N-N_1}\frac{1}{c_j''}\right\}. \tag{8}$$

在均匀背景中，对于任意给定的 P_{fa} ，对 (7) 式用牛顿迭代法可求得 MCM-CFAR 检测器的门限参数 T 。若 $P_{fa} = 10^{-6}$ ，参考单元总数 $R = M + N = 32$ ，表 1 给出了 MCM-CFAR 检测器的部分门限参数 T 和 ADT 的值。从 ADT 的结果来看， MCM-CFAR 检测器在均匀背景中的性能是优于 GOSCA 和 OS 的，例如， OS 在 $R = 32$ 、 $k = 27$ 时的 ADT 最优值为 19.025 ， GOSCA 在 $M = N = 16$ ， $k = l = 14$ 时的 ADT 最优值为 18.919 ，而 MCM-CFAR 在 $M = N = 16, M_1 = 2, N_1 = 2$ 时的 ADT 值为 18.028 ，这时它能容纳 4 个干扰目标。

表 1 MCM-CFAR 的部分门限参数 T 和 ADT 的值 ($P_{fa}=10^{-6}$, $M=N=16$)

	$N_1=0$	$N_1=1$	$N_1=2$	$N_1=3$
$M_1=0,T$	8.64	9.47	10.19	10.85
ADT	17.28	17.45	17.64	17.83
$M_1=1,T$	9.47	10.47	11.33	12.14
ADT	17.45	17.61	17.81	18.02
$M_1=2,T$	10.19	11.33	12.33	13.29
ADT	17.64	17.81	18.03	18.26
$M_1=3,T$	10.85	12.14	13.29	14.39
ADT	17.83	18.02	18.26	18.51
$M_1=4,T$	11.51	12.95	14.24	15.51
ADT	18.04	18.24	18.50	18.78

3 MUCM-CFAR 检测器及其在均匀背景中的性能

MUCM-CFAR 检测器也采用前、后两个滑窗的子滑窗技术．但它的前、后沿参考滑窗均采用 Ritcey[5] 提出的对杂波样本加权的无偏筛选平均法，它能实现对杂波功率水平的无偏最小方差估计 (UMVE)，为区别于 Rickard 和 Dillard[1] 提出的取平均的 CM 法，将这种方法称为 UCM 法．

MUCM-CFAR 检测器的前、后沿滑窗均采用 UCM 方法产生对杂波功率水平的两个估计量 X 和 Y，即先筛除掉最大的几个有可能成为干扰目标的样本，对剩下的样本加权取平均

$$X=\frac{1}{M-M_1}\left[\sum_{i=1}^{M-M_1}x_{(i)}+M_1x_{(M-M_1)}\right],\quad Y=\frac{1}{N-N_1}\left[\sum_{j=1}^{N-N_1}y_{(j)}+N_1y_{(N-N_1)}\right]\tag{9}$$

X 和 Y 的 mgf 分别为

$$\Phi_X(u)=\prod_{i=1}^{M-M_1}\frac{M-M_1}{u+M-M_1},\qquad \Phi_Y(u)=\prod_{j=1}^{N-N_1}\frac{N-N_1}{u+N-N_1}.\tag{10}$$

可以看出，与利用 $(M-M_1)$ 或 $(N-N_1)$ 个杂波样本的 CA 法一样，这意味着 UCM 在均匀背景中具有与减少了样本数 CA 一样的性能．

MUCM-CFAR 检测器取前、后沿滑窗两个局部估计的和作为检测器对杂波功率水平的估计

$$Z=X+Y.\tag{11}$$

Z 的 mgf 为

$$\Phi_Z(u)=\Phi_X(u)\Phi_Y(u).\tag{12}$$

将上式代入 (7) 式，可得 MUCM-CFAR 检测器的平均虚警概率和平均检测概率的解析表达式．

MUCM-CFAR 的 ADT 的解析表达式为

$$\mathrm{ADT}_{\text{MUCM-CFAR}}=2T.\tag{13}$$

表 2 给出了 MUCM-CFAR 检测器的部分门限参数 T 和 ADT 的值．从 ADT 的结果来看，MUCM 检测器在均匀背景中的性能是不错的，例如，MUCM-CFAR 在 $M=N=16$, $M_1=2$, $N_1=2$ 时的 ADT 值为 17.861，这时它能容纳 4 个干扰目标，比 MCM-CFAR 还要好．

表 2 MUCM-CFAR 的部分门限参数 T 和 ADT 的值 ($P_{fa}=10^{-6}$, $M=N=16$)

	$N_1=0$	$N_1=1$	$N_1=2$	$N_1=3$
$M_1=0,T$	8.64	8.71	8.78	8.87
ADT	18.28	17.41	17.56	17.73
$M_1=1,T$	8.71	8.77	8.85	8.94
ADT	17.41	17.55	17.70	17.88
$M_1=2,T$	8.78	8.85	8.93	9.02
ADT	17.56	17.70	17.86	18.04
$M_1=3,T$	8.87	8.94	9.02	9.12
ADT	17.73	17.88	18.04	18.23
$M_1=4,T$	8.97	9.04	9.13	9.22
ADT	17.93	18.08	18.26	18.45

4 MCM-CFAR 和 MUCM-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，这也是最糟糕情况的分析。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，对于弱干扰目标，检测损失将变小。表 3 给出了在 Swerling II 型目标条件下，几种检测器出现多目标时的 CFAR 损失。由于 MCM 和 MUCM 采用了自动筛选技术，使前沿滑窗剔除的样本数多一些，后沿滑窗少一些， MCM 选取 $M=16, N=16, M_1=4, N_1=2$； MUCM 选取 $M=16, N=16, M_1=4, N_1=2$； GOSCA 选取 $M=N=16, k=12, l=14$； CM 选取 $R=32, s=6$； UCM 选取 $R=32, s=6$； OS 选取 $R=32, k=26$。从表 3 中的结果可以看出， MCM-CFAR 和 MUCM-CFAR 检测器在均匀背景和多目标环境中的性能均明显优于 GOSCA 和 OS；在 IL=4、IR=2 时， MCM-CFAR 比 OS 改善了 2dB， MUCM-CFAR 也比 OS 改善了 1.5dB，在均匀背景中， MUCM-CFAR 的性能要比 MCM-CFAR 略好一些； MCM 的性能略优于 CM， MUCM 与 UCM 接近，但它们两个的样本排序时间不足 CM 和 UCM 的一半，便于工程实现。

表 3 几种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	4,0	4,1	4,2
CM	1.282	1.532	1.804	1.804	2.103	2.440	2.103	2.440	2.838	2.440	2.838	3.364
UCM	1.200	1.493	1.818	1.818	2.187	2.622	2.187	2.622	3.175	2.622	3.175	4.022
MCM	1.262	1.470	1.799	1.725	2.037	2.494	2.057	2.347	2.775	2.552	2.812	3.199
MUCM	1.205	1.475	1.813	1.816	2.130	2.642	2.281	2.566	3.033	3.051	3.292	3.692
GOSCA	1.410	1.671	2.210	2.009	2.511	3.404	2.501	2.955	3.771	3.385	3.762	4.461
OS	1.390	1.752	2.160	2.160	2.635	3.212	2.635	3.212	3.973	3.212	3.973	5.194

CM: $R=32, s=6$,　UCM: $R=32, s=6$,　MCM: $M=16, N=16, M_1=4, N_1=2$
MUCM: $M=16, N=16, M_1=4, N_1=2$,　GOSCA: $M=16, k=12, l=14$,　OS: $R=32, k=26$

5 结　论

本文基于筛选平均 (CM) 和无偏筛选平均 (UCM) 提出了两种改进的恒虚警检测器——MCM-CFAR 和 MUCM-CFAR。分析结果表明，它们在均匀背景和多目标环境中均获得了明显优于 GOSCA 和 OS 的性能；当 IL=4、IR=2 时， MCM-CFAR 比 OS 改善了 2dB， MUCM-CFAR 也比 OS 改善了 1.5dB，在均匀背景中， MUCM-CFAR 的性能要比 MCM-CFAR 略好一些； MCM 的性能略优于 CM， MUCM 与 UCM 接近。当干扰目标数超过前、后沿滑窗能

够容许的目标数时，MCM-CFAR 能够提供比 MUCM-CFAR 更加鲁棒的性能，但由于采用了自动筛选技术，增强了检测器的抗干扰目标能力，使得这种机会变小．由于它们采用前、后沿两个子滑窗进行局部估计，使得它们的样本排序时间不足 CM 、 UCM 和 OS 的一半，故它们是比较容易实现的恒虚警检测器．对于瑞利分布恒虚警检测，将进一步提出剔除平均最大选择 (TMGO) 和剔除平均最小选择（ TMSO ）两种方案．

参　考　文　献

[1] Rickard J T, Dillard G M. Adaptive detection algorithms for multiple-target situations. IEEE Trans. on AES, 1977, AES-13(4): 338–343.

[2] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. IEEE Trans. on AES, 1983, AES-19(4): 608–621.

[3] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR processors in nonhomogeneous background. IEEE Trans. on AES, 1988, AES-24(4): 427–445.

[4] He You. Performance of some generalized modified order statistics CFAR detectors with automatic censoring technique in multiple target situations. IEE Proc. -F, 1994, 141(4): 205–212.

[5] Ritcey J A. Performance analysis of the censored mean level detector. IEEE Trans. on AES, 1986, AES-22(4): 443–454.

[6] Meng Xiangwei, He You. A new CFAR detector with automatic censoring. In Proc. of International Conference on Signal Processing (ICSP'96), Beijing: 1996, 1632–1635.

TWO MODIFIED CFAR ALGORITHMS FOR MULTIPLE TARGETS SITUATION

Meng Xiangwei　　He You

(*Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai* 264001)

Abstract Two modified censored mean (MCM) and modified unbiased censored mean (MUCM) CFAR algorithms are proposed. Both split the reference window into two sub-windows which apply CM or UCM method to create two local noise power estimations, the mean value of them are taken to set an adaptive threshold. Both use the automatic censoring technique proposed by He You (1994). Under Swerling II assumption, considering Rayleigh distributed noise and single-pulse square-law detection, the analytic expressions of P_{fa}, P_d and ADT of both are derived. By comparison with other schemes, the results show that their performances are evidently superior to that of GOSCA and OS in homogeneous background and in multiple target situations, in the case of IL=4, IR=2, the CFAR loss of MCM is improved by 2 dB relative to that of OS, that of MUCM is improved by 1.5 dB over OS. The performance of MCM is slightly better than that of CM, the performance of MUCM is the nearly same as that of UCM, but their sample sorting time is less than half of that of CM, UCM and OS.

Key words Radar, Detection, CFAR, Order statistics

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．

何　友：　男，1956 年生，教授，中国电子学会高级会员，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．