

## 一种新的最大选择恒虚警检测器<sup>1</sup>

何 友 关 键 Hermann Rohling\*

(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

\*(西德布伦瑞克工业大学)

**摘 要** 本文提出一种基于有序统计(OS)和单元平均(CA)产生局部估计,并应用最大选择(GO)产生检测单元杂波功率水平估计 $Z$ 的新的恒虚警检测器(OSCAGO)。我们推导出了该检测器在 Swerling II 型目标假设下的虚警概率( $P_{fa}$ )、检测概率( $P_d$ )和度量平均判决门限(ADT)解析表达式。分析了它在均匀背景和强干扰环境中的检测性能。并且把它与 OS-, GOSGO-CFAR 进行了比较。结果表明, OSCAGO 在均匀杂波背景和多目标情况下的检测性能与 OS 和 GOSGO 相比,都有很明显的提高。在干扰目标数为某些值时, OSCAGO 的 CFAR 损失比 GOSGO 小近 3dB。

**关键词** 雷达, 检测, 恒虚警率, 信号处理

**中图分类号** TN950, TN911.7

### 1 引 言

雷达信号的检测总是在杂波背景上进行的。在雷达自动检测系统中,对于一个固定检测门限,如果杂波电平增大几分贝,虚警率将急剧增加。因此,要求检测器具有恒虚警性能。称此种技术为恒虚警率(CFAR)处理技术。现有的 CFAR 处理方法种类繁多,其中,单元平均(CA)<sup>[1]</sup>,最大选择(GO)<sup>[2]</sup>,最小选择(SO)<sup>[3]</sup>比较有代表性,被认为是经典的 CFAR 方法。但是,它们还不能很好地适应背景噪声功率强度在空间或时间上的变化。其原因在于它们产生杂波功率水平估计 $Z$ 的方法没能有效地分离不同特性的杂波区。因此,在杂波区边缘和多目标环境中会发生 $P_{fa}$ 上升和覆盖现象<sup>[4,5]</sup>。为了解决这个问题, Rohling<sup>[6]</sup>提出了有序统计恒虚警率(OS-CFAR)方法。它在均匀杂波背景和多目标情况下均具有较好的检测性能。OS-CFAR 的缺点是样本排序处理时间长。为克服该缺点,文献[7]提出两种修正有序统计恒虚警方法。它们是有序统计最大选择(OSGO)和有序统计最小选择(OSSO)。文献[8,9]提出的 GOSGO 则是广义的 OSGO,并且应用了一种新的自动筛选技术。在多目标环境中,当干扰目标数达到可容许的最大干扰目标数时, GOSGO 获得了优于 OS 的检测性能。本文提出的是一种基于 OS 和 CA 产生局部估计,并应用了 GO 来产生检测单元杂波功率水平估计 $Z$ 的新的 OSCAGO-CFAR 检测器。这种检测器也采用了文献[8,9]中的自动筛选技术。在 Swerling II 型目标假设下,我们推出了虚警概率,检测概率和度量平均判决门限(ADT)解析表达式,分析了 OSCAGO-CFAR 在均匀背景和强干扰目标环境中的检测性能,并把它与 OS- 和 GOSGO-CFAR 进行了比较。

<sup>1</sup> 1994-08-24 收到, 1995-02-28 定稿  
国防科研基金资助课题

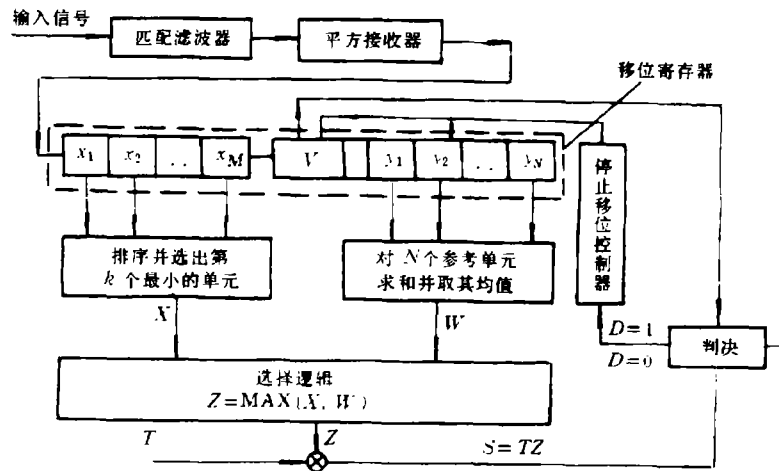


图 1 OSCAGO-CFAR 检测器结构框图

## 2 检测原理与基本数学模型

OSCAGO-CFAR 检测器的结构如图 1。其中  $V$  是检测单元，两侧为参考单元（也称作参考滑窗）。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。自适应判决准则为

$$V \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} TZ, \quad (1)$$

其中  $H_1$  表示有目标， $H_0$  表示没有目标， $Z$  是杂波功率水平估计， $T$  是标称化因子， $V$  代表检测单元采样值。图 1 中的停止移位控制器和参考单元移位寄存器形成自动筛选功能<sup>[8,9]</sup>。

假设接收机噪声是高斯分布，检测包络服从瑞利分布，并且本文仅考虑单脉冲平方检测。这样对于 Swerling II 型目标，可得二元假设检验对为

$$V \sim \begin{cases} f_0(v) = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{v}{\mu}\right), & H_0; \\ f_1(v) = \frac{1}{a\mu} \exp\left(-\frac{v}{a\mu}\right), & H_1, v > 0; \end{cases} \quad (2)$$

其中  $a = 1 + \lambda$ ， $\lambda$  是信噪比 (SNR)。由于在纯噪声情况下采样获得的参考单元变量  $x_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) 和  $y_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) 是统计独立和同分布的，它们的共同概率密度函数 (PDF) 为

$$f_x(x) = f_y(x) = (1/\mu) \exp(-x/\mu), \quad x > 0. \quad (3)$$

共同的概率分布函数 (CDF) 为

$$F_x(x) = F_y(x) = 1 - e^{-x/\mu}, \quad x > 0. \quad (4)$$

OSCAGO 的前沿滑窗估计器采用 OS 方法, 后沿滑窗估计器采用 CA 方法

$$X = x(k), \quad W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i. \quad (5)$$

可以证明<sup>[6]</sup>, 来自  $M$  个总体样本的第  $k$  个排序样本  $x(k)$  的概率密度函数为

$$f_x(x) = \frac{1}{\mu} k \binom{M}{k} (1 - e^{-x/\mu})^{k-1} e^{-(M-k+1)x/\mu}, \quad (6)$$

而它的 CDF 为

$$F_x(x) = \sum_{i=k}^M \binom{M}{i} (1 - e^{-x/\mu})^i e^{-(M-i)x/\mu}. \quad (7)$$

由 CA 方法产生的  $W$  的 PDF 和 CDF 分别为

$$f_w(w) = \frac{N^N}{\mu} \left(\frac{w}{\mu}\right)^{N-1} \frac{e^{-Nw/\mu}}{\Gamma(N)}, \quad (8)$$

$$F_w(w) = 1 - e^{-Nw/\mu} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(Nw/\mu)^i}{i!}. \quad (9)$$

对于任意一个应用判决准则 (1) 式的 CFAR 检测器,  $V$  和  $Z$  是独立的随机变量。因此在均匀杂波背景中 CFAR 检测器的检测概率为<sup>[9]</sup>

$$P_d = d_z(u) | u = T/(a\mu); \quad (10)$$

虚警概率为

$$P_{fa} = d_z(u) | u = T/\mu. \quad (11)$$

$d_z(u)$  是  $Z$  的矩产生函数 (moment generating function, mgf), 其定义为

$$d_z(u) = \int_0^{\infty} e^{-uz} f_z(z) dz. \quad (12)$$

### 3 OSCAGO-CFAR 检测器

OSCAGO-CFAR 检测器取两个局部估计 (见 (5) 式) 中的较大者作为杂波功率水平估计  $Z$

$$Z = \max(X, W). \quad (13)$$

定义在 (13) 式中的  $Z$  的概率密度函数为

$$f_z(z) = f_x(z)F_w(z) + f_w(z)F_x(z). \quad (14)$$

$Z$  的矩母函数为

$$d_z(u) = k \binom{M}{k} \left[ \frac{\Gamma(M-k+1+\mu u)\Gamma(k)}{\Gamma(M+\mu u+1)} - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+1-k+j+\mu u} \right)^{i+1} \right] + \sum_{i=k}^M \binom{M}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+j-i+\mu u} \right)^N. \quad (15)$$

把 (15) 式代入 (10) 式, 可得 OSCAGO-CFAR 检测器的检测概率为

$$P_d = \frac{M!\Gamma[M-k+T/(1+\lambda)+1]}{(M-k)!\Gamma[M+T/(1+\lambda)+1]} - k \binom{M}{k} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+1-k+j+T/(1+\lambda)} \right)^{i+1} + \sum_{i=k}^M \binom{M}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+j-i+T/(1+\lambda)} \right)^N; \quad (16)$$

虚警概率为

$$P_{fa} = \frac{M!\Gamma(M-k+T+1)}{(M-k)!\Gamma(M+T+1)} - k \binom{M}{k} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+1-k+j+T} \right)^{i+1} + \sum_{i=k}^M \binom{M}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+j-i+T} \right)^N. \quad (17)$$

对于任意一个给定的  $P_{fa}$ , 解 (17) 式得到 OSCAGO-CFAR 检测器的阈值参数  $T$ 。

在 CFAR 处理器的性能分析中, ADT 是计算检测性能损失的一种可供选择的度量。对于某一给定的  $P_{fa}$ 、 $M$  和  $N$ , ADT 是独立于检测概率的。ADT 被定义为标称化的量<sup>[6]</sup>。

OSCAGO-CFAR 的 ADT 的表达式为

$$\text{ADT}_{\text{OSCAGO}} = T \left[ \sum_{i=1}^k \frac{1}{M-k+i} - \frac{1}{N^2} k \binom{M}{k} \sum_{i=0}^{N-1} (i+1) \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+1-k+j} \right)^{i+2} + \sum_{i=k}^M \binom{M}{i} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} (-1)^j \left( \frac{N}{M+N+j-i} \right)^{N+1} \right]. \quad (18)$$

表 1 几种检测器在多目标环境中的 CFAR 损失 (dB)  $P_{fa} = 10^{-6}, P_d = 0.5$ 

IL, IR	0, 0	1, 0	1, 1	2, 0	2, 1	3, 0	3, 1	3, 2	4, 0	4, 2	5, 0	6, 0
OSCAGO	1.2810	1.2908		1.3140		1.3709			1.5167		1.9127	3.1847
GOSGO	1.5541	1.9739	2.2733	2.5266	2.7339	3.2912	3.4099	3.9542	4.5745	4.8900		
OS	1.3925	1.7564	2.1597	2.1597	2.6404	2.6404	3.2109	3.9759	3.2109	5.1926	3.9759	5.1926

OSCAGO:  $M=8, k=2, N=24$ ; GOSGO:  $M=24, k=20, N=8, l=6$ ; OS:  $M=N=16, k=26$

在均匀背景中, OSCAGO 的检测性能不仅比 GOSGO 要好;甚至比 OS 还好。例如,  $M=8, N=24, k=3$  或  $4$  时, OSCAGO 的 ADT=18.4。然而,  $R=32, k=28$  时, OS 的 ADT=19.049。

#### 4 OSCAGO-CFAR 在多目标环境中的检测性能

这里仅分析强干扰目标的影响,即假定干扰与噪声功率比 (INR) 很大,因此干扰目标的回波总是占据最高的有序统计采样。并且由于采用了自动筛选技术,干扰目标进入后沿滑窗的概率很小。所以仅考虑干扰目标分布在前沿滑窗中的情况。这样当干扰目标数小于或等于有序统计所容许的最大干扰目标数时,可以通过用  $M-IL$  和  $N-IR$  代替 (18) 式中的  $M$  和  $N$  来获得 OSCAGO 在多目标环境中的检测性能 (IL、IR 分别代表前、后沿滑窗中的干扰目标数)。表 1 给出了在 Swerling II 型目标条件下几个检测器的 CFAR 损失。

从表 1 的结果可以看出, OSCAGO-CFAR 在均匀干扰背景和多目标情况下的检测性能都比 OS 和 GOSGO 明显地好。并且随着干扰目标数变化,这种差距也发生明显的变化。在上述取值时,当干扰目标数等于 4 时, OSCAGO 的 CFAR 损失比 GOSGO 减少了将近 3dB。由此可见 OSCAGO 在检测性能方面的明显优势。

#### 5 结 论

本文提出的 OSCAGO-CFAR 检测器在给定的条件下在均匀背景和强干扰目标环境中的检测性能与 OS-、GOSGO-CFAR 相比,在所有可容许的干扰目标数的取值时都获得了明显的改善。这种改善随着干扰目标数的变化有明显的变化。当干扰目标数为某些值时, OSCAGO 的 CFAR 损失比 GOSGO 减少了近 3dB。另外,在杂波边缘情况下, OSCAGO 也将较 OS、OSGO 和 GOSGO 更有效。如果右边子滑窗的局部估计选用筛选平均 (Censored Mean Linear Detector, CMLD) 或剔除平均 (Trimmed Mean, TM), 那么又可以得到两种新的 CFAR 检测器: OSCMGO 和 OSTMGO-CFAR 检测器。

#### 参 考 文 献

- [1] Finn H M, Johnson R S. RCA Rev., 1968, 29(9): 414-464.
- [2] Hansen V G. Constant False Alarm Rate Processing in Search Radars. IEEE International Radar Conference, LONDON: 1973, 325-332.
- [3] Trunk G V. IEEE Trans. on AES 1978, AES-14(5): 750-755.
- [4] Al-Hussaini E K, Ibrahim B M. IEE Proc.-F 1986, 133(3): 217-223.
- [5] Richard J T, Dillard G M. IEEE Trans. on AES 1977, AES-13(4): 338-343.
- [6] Rohling H. IEEE Trans. on AES 1983, AES-19(4): 608-621.

- [7] Elias A R, de Mercado M G, Davo E R. IEEE Trans. on AES 1990, AES-26(1): 197-202.
- [8] 何 友, Rohling H. 电子科学学刊, 1994, 16(6): 582-590.
- [9] He Y. IEE Proc.-F 1994, 141(4): 205-212.

## A NEW CFAR DETECTOR WITH GREATEST OPTION

He You    Guan Jian

(*Technical University of Yantai, Yantai 264001*)

Hermann Rohling

(*Technical University of Braunschweig, Germany, 38092 Braunschweig*)

**Abstract** This paper presents a new Constant-False-Alarm Ratio(CFAR) detector based on Ordered Statistics(OS) and Cell-Averaging(CA) forming local estimates, and using Greatest-Option (GO) to form interference power level estimate Z in test cell (OSCAGO). Under the Swerling II assumption, the analytic expressions of false-alarm probability ( $P_{fa}$ ), detection probability ( $P_d$ ) and Average Decision Threshold (ADT) of this detector are derived, its detection performances in homogeneous background and in strong interfering targets environment are analyzed, and compared with that of OS-, GOSGO-CFARs. Results show that the detection performances of OSCAGO in homogeneous background and in multiple-target situations are all obviously better than those of OS and GOSGO. When the number of interfering targets is equal to certain value, the CFAR loss of OSCAGO is about 3dB less than that of GOSGO.

**Key words** Radar, Detection, CFAR, Signal processing

何 友: 男, 1956 年生, 教授, 主要研究方向有: 雷达自适应检测方法、多目标跟踪、多传感器数据融合、火炮射表编制和数据处理等.

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

H. Rohling: 男, 1946 年生, 教授, 研究领域: 信号理论、雷达信号处理、检测估值和传输.