

文章编号: 1001-0920(2006)04-0421-04

分布式自适应 CMLWCA CFAR 检测方法

江 晶^{1,2}, 杨 军², 马晓岩², 孙 洪¹

(1. 武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079; 2. 空军雷达学院 信息与指挥自动化系, 武汉 430019)

摘 要: 针对分布式多传感器系统中不同传感器的信噪比会影响检测决策, 提出一种利用各传感器信噪比决定其权值的自适应删除均值加权单元平均(CMLWCA)恒虚警率(CFAR)检测的新方法. 在假定目标服从 Swerling II 起伏的情况下, 导出了相应的检测概率与虚警概率闭式解. 多种检测器数值分析的比较结果表明了该方法的有效性和优越性.

关键词: 分布式检测; 恒虚警率; 检测概率; 虚警概率

中图分类号: O211 文献标识码: A

D istributed Adaptive CMLWCA CFAR Detection Method

J I A N G J i n g^{1,2}, Y A N G J u n², M A X i a o - y a n², S U N H o n g¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Department of Information and Command Automatization, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China. Correspondent: JIANG Jing, E-mail: jiangj36@sina.com)

Abstract: To find a solution to decision of detection in distributed multi-sensor systems that every sensor has its own SNR (signal-noise-ratio), a novel distributed CFAR detector, named CMLWCA (censored mean level weighted cell-averaging), is proposed based on LRT (likelihood ratio test). In the scheme, the weights are decided by the SNR of each sensor, therefore the detector can hold CFAR properties in spite of different SNR that sensors may have. In the case that target fluctuating is Swerling II, closed-forms of probability of detection and probability of false alarm are derived. The numerical analysis results of the CMLWCA detector show its good detection performance.

Key words: Distributed detection; CFAR; Probability of detection; Probability of false alarm

1 引 言

分布式多传感器系统在雷达、机器人、环境检测、自动控制等领域有广泛的应用背景,其目的是通过采用数据融合技术,提升系统整体性能.例如,在雷达自动检测系统中,当雷达处于非平稳噪声(或噪声加杂波)背景时,目标检测问题变得相当复杂.对于固定阈值检测,如果噪声平均功率仅仅增加几个分贝,虚警率将急剧增加,导致显示器画面饱和或数据处理设备过载.此时,即使信噪比较大,也难以做出正确的判决.因此,必须采用自适应门限技术,即 CFAR,以保证雷达正常工作^[1,2].

分布式信号检测在处理速度、可靠性和通信带宽等方面具有独特优势,因此,近年来一直是多传感器检测的研究热点.传统的分布式多传感器 CFAR 检测思想是:首先各传感器通过各自 CFAR 处理,以获得二元(0, 1)局部判决,再将各自的判决结果送到融合中心进行全局判决.其中典型的局部判决方法有单元平均(CA)CFAR,有序统计(OS)CFAR^[3],选大(GO)CFAR,选小(SO)CFAR^[4],选择与估计检验^[5],自适应 CA CFAR^[6],OS CFAR 和删除均值(CML)^[7]等,而全局判决主要通过逻辑“与”和逻辑“或”完成^[8,9].

收稿日期: 2005-03-07; 修回日期: 2005-06-06

基金项目: 国家 863 高新技术计划基金项目(2002AA 135320).

作者简介: 江晶(1964—),男,湖北浠水人,副教授,博士生,从事现代数字信号处理、雷达信号与信息处理等研究;
孙洪(1954—),女,武汉人,教授,博士生导师,从事现代数字信号处理、合成孔径雷达图像解译等研究.

与传统方法不同,文献[10]提出了一种新的分布式CFAR处理方法,该方法传输到信息中心的是各传感器的检测单元幅度值和杂波/噪声电平,而不是二元值.此外,在融合中心,该方法对检测单元全局估计采用CA方法,对杂波全局估计采用GO或SO方法.数值分析结果表明该方法在不同背景下的检测性能明显优于传统的分布式检测方法.

本文提出一种在似然比意义下的CFAR检测新方法:自适应删除均值加权单元平均CFAR检测方法.在该方法中,首先用CML方法得到各传感器的杂波/噪声电平估计,然后将检测单元电平与估计得到的杂波/噪声电平比值作为各传感器的局部统计量传输到融合中心.在融合中心,各传感器送来的局部统计量以加权单元平均(WCA)形式形成全局统计量,最后将该全局统计量与相应的门限进行比较得到有无目标的判决.其中,权值由各传感器中的信噪/杂比决定,因此,与现有方法相比,该方法不受各传感器检测单元中信噪/杂比必须相同的限制,更接近实际.在目标服从Swerling II起伏情况下,导出了相应的检测概率与虚警概率闭式解.数值分析结果表明,CMLWCA方法的检测性能明显优于OSAND和OSOR方法,而略差于COS和MOS方法^[10].但值得注意的是该方法与文献[10]相比,主要优点在于:一方面该方法不受各传感器杂波必须具有相同统计特性的约束;另一方面,该方法所需的通信带宽为文献[10]方法的一半.

2 分布式CMLWCA CFAR检测器

由N个传感器组成的分布式CMLWCA CFAR检测器的结构形式如图1所示.

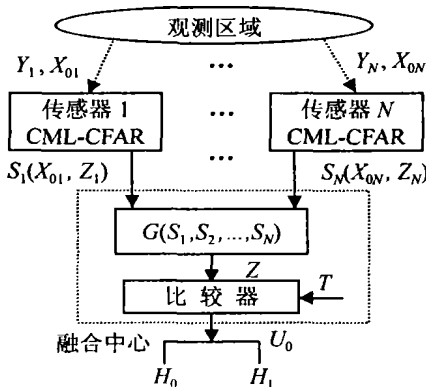


图1 分布式CMLWCA CFAR处理原理框图

图1中, X_{0i} 表示第 i 个传感器的检测单元样本值, $Y_i = \{Y_{ij}\}$ 为各传感器参考单元的观测值, Y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N_i$) 表示第 i 个传感器的第 j 个样本值, N_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为第 i 个传感器的参考单元数, 并假设所有传感器都对同一区域进行

观测.此时CMLWCA CFAR处理主要过程为:首先对第 i 个传感器参考单元样本 $\{Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iN_i}\}$ 进行升序排序,即为 $Y_{i(1)}, Y_{i(2)}, \dots, Y_{i(N_i)}$,其中 $Y_{i(r)}$ 表示第 r 个最小值;然后将最大的 n_i 个样本删除,并对剩余的 $N_i - n_i$ 样本求平均得到第 i 个传感器杂波的估计 Z_i ;最后将检测单元与杂波估计的比值作为局部统计量 $S_i = x_{0i}/Z_i$ 送到融合中心.在融合中心,全局统计量 Z 通过WCA的形式得到,即

$$Z = G(S_1, S_2, \dots, S_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i X_{0i} / Z_i,$$

全局判决则通过 Z 与门限 T 的大小获得,其值由虚警概率决定.

假设 $Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iN_i}$ 是独立同分布(IID)且服从指数分布,即 $E\{Y_{ij}\} = \lambda_{0i}$,其中 λ_{0i} 表示第 i 个传感器的噪声功率,相应的概率密度函数和概率分布函数分别表示为 $f(y)$ 和 $F(y)$.在检测单元目标服从Swerling II型起伏情况下,检测单元的均值可表示为

$$\lambda_{0i} = \begin{cases} \lambda_{0i} \text{ or } \lambda_{0i}(1 + \text{CNR}), & H_0; \\ \lambda_{0i}(1 + \text{SNR}), & H_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: H_1 表示检测单元中存在目标, H_0 表示检测单元中不存在目标, $\lambda_{0i} = \lambda_{0i}(1 + \text{SNR})$ 代表信号加噪声功率, SNR 为信噪比, CNR 为杂波噪声比.

为方便起见且不失一般性,这里对两个传感器的CMLWCA CFAR检测性能进行分析,在融合中心,似然比检验(LRT)意义下,由式(1)得到

$$LR = \frac{\int_{x_{01}}^{\infty} f_{x_{01}}(x_{01} | H_1) dx_{01}}{\int_{x_{01}}^{\infty} f_{x_{01}}(x_{01} | H_0) dx_{01}} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\geq}} T_L. \quad (2)$$

其中 T_L 为相应门限.对式(2)化简得

$$\left(\frac{1}{\lambda_{01}} - \frac{1}{\lambda_{01}} \right) X_{01} + \left(\frac{1}{\lambda_{02}} - \frac{1}{\lambda_{02}} \right) X_{02} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\geq}} T. \quad (3)$$

式(3)可写为

$$\frac{X_{01}}{\lambda_{01}} + W \frac{X_{02}}{\lambda_{02}} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\geq}} T. \quad (4)$$

其中

$$W = \frac{r_1 + 1}{r_1 + L}, r_i = \frac{\lambda_{0i} - \lambda_{0i}}{\lambda_{0i}},$$

$$L = r_1/r_2, S_i = X_{0i}/Z_i, Z_i = \frac{1}{N_i - n_i} \sum_{k=1}^{N_i - n_i} Y_{i(k)}. \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得融合中心的全局统计量为

$$Z = S_1 + W S_2 \quad (6)$$

根据文献[11],检测概率、虚警概率与矩母函数之间的关系为

$$P_d = - \text{res}_k [M_x |_{H_1}(s) M_z(-Ts) / s, s_k], \quad (7)$$

$$P_{fa} = \sum_k \text{res}[M_{X|H_0}(s)M_Z(-Ts)/s, s_k] \quad (8)$$

其中: $\text{res}[\cdot]$ 表示留数, $s_k (k = 1, 2, \dots)$ 为矩母函数 $M_{X|H_1}(s)$ 或 $M_{X|H_0}(s)$ 中位于复 S 平面左半平面内的所有极点, $M_{X|H_1}(s)$ 和 $M_{X|H_0}(s)$ 分别表示在 H_1 假设和 H_0 假设下的矩母函数, 即

$$M_{X|H_i}(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X|H_i}(x) e^{-sx} dx, \quad i = 1, 0 \quad (9)$$

在 CMLW CA CFAR 处理器中, Z_i 对应的矩母函数可表示为^[7]

$$M_{X_i}(s) = \prod_{t=1}^{N_i - n_i} \frac{c_t}{s + c_t} = \prod_{t=1}^{N_i - n_i} \frac{a_t}{s + c_i} \quad (10)$$

其中

$$a_t = c_t \prod_{j=1, j \neq t}^{N_i - n_i} \frac{c_j}{c_j - c_t} = C_{N_i}^{n_i} C_{N_i - n_i}^{t-1} (-1)^{t-1} \left(\frac{N_i - t + 1 - n_i}{n_i} \right)^{N_i - n_i - 1},$$

$$c_t = \frac{N_i - t + 1}{N_i - n_i - t + 1} \quad (11)$$

根据矩母函数与概率密度函数之间的关系, Z_i 的概率密度函数可表示为

$$f_{Z_i}(z) = \prod_{t=1}^{N_i - n_i} a_t e^{-c_t z} \quad (12)$$

从而 S_i 的概率密度函数可表示为

$$f_{S_i}(s) = \int_0^{\infty} z f_{X_{0i}}(sz) f_{Z_i}(z) dz = \int_0^{\infty} z f_{X_{0i}}(sz) f_{Z_i}(z) dz \quad (13)$$

将式(6)、式(12)代入式(13)得

$$f_{S_i}(s) = \int_0^{\infty} z f_{X_{0i}}(sy) f_{Z_i}(z) dz = \int_0^{\infty} z \prod_{t=1}^{N_i - n_i} \frac{a_t}{1 + r_i} e^{-z \left(\frac{s}{1+r_i} + c_t \right)} dz \quad (14)$$

令 $d_i = \frac{1}{1 + r_i}$, 则式(14)可表示为

$$f_{S_i}(s) = \int_0^{\infty} z \prod_{t=1}^{N_i - n_i} \frac{1}{1 + r_i} e^{-z \left(\frac{s}{1+r_i} + c_t \right)} dz = \int_0^{\infty} d_i \prod_{t=1}^{N_i - n_i} a_t z e^{-z(sd_i + c_t)} dz = \prod_{t=1}^{N_i - n_i} \frac{a_t}{d_i} \left(s + \frac{c_t}{d_i} \right)^{-2} \quad (15)$$

当 S_1 与 S_2 统计独立时, 它们的联合概率密度函数可表示为

$$f_{S_1, S_2}(s_1, s_2) = f_{S_1}(s_1) f_{S_2}(s_2) \quad (16)$$

因此, CMLW CA 检测器的检测概率可以表示为

$$P_d^{\text{CMLWCA}} = p_r[S > T] = \iint_{s_1 + W s_2 > T} f_{S_1, S_2}(s_1, s_2) ds_1 ds_2 \quad (17)$$

将式(15)和式(16)代入式(17)得

$$P_d^{\text{CMLWCA}} = \iint_{s_1 + W s_2 > T} A B ds_1 ds_2$$

其中

$$A = \prod_{t=1}^{N_1 - n_1} d_1 a_t (d_1 s_1 + c_t)^{-2},$$

$$B = \prod_{k=1}^{N_2 - n_2} d_2 a_k (d_2 s_2 + c_k)^{-2}.$$

则

$$P_d^{\text{CMLWCA}} = \prod_{t=1}^{N_1 - n_1} \prod_{k=1}^{N_2 - n_2} d_1 d_2 a_t a_k C \quad (18)$$

其中

$$C = \iint_{s_1 + W s_2 > T} (d_1 s_1 + c_t)^{-2} (d_2 s_2 + c_k)^{-2} ds_1 ds_2$$

化简式(18)可得

$$P_d^{\text{CMLWCA}} = W D \prod_{t=1}^{N_1 - n_1} \prod_{k=1}^{N_2 - n_2} a_t a_k E \quad (19)$$

其中

$$E = \frac{\ln(T + W D_k)(T + D_t) / W D_k D_t}{(T + W D_k + D_t)^2} + \frac{W D_k + D_t}{W D_k D_t (T + W D_k + D_t)},$$

$$D_t = \frac{c_t}{d_1}, D_k = \frac{c_k}{d_1}, D = \frac{1}{d_1 d_2}$$

根据虚警概率与检测概率的关系, 在式(19)中, d_1, d_2 和 W 均为 1 时, 对应为 CMLW CA 检测器的虚警概率表达式, 即

$$P_{fa}^{\text{CMLWCA}} = \prod_{t=1}^{N_1 - n_1} \prod_{k=1}^{N_2 - n_2} \left(a_t a_k \left[\frac{\ln(T + c_k)(T + c_t) / c_k c_t}{(T + c_k + c_t)^2} + \frac{c_k + c_t}{c_k c_t (T + c_k + c_t)} \right] \right) \quad (20)$$

由此, CMLW CA 检测器的检测概率和虚警概率表达式分别由式(19)和式(20)得到

3 检测器数值分析

为得到 CMLW CA 检测器的检测性能, 将本文提出的检测器与以下几种检测器进行对比: 集中式 OS 检测器 (COS CFAR)、传统分布式检测器中的 OSAND CFAR 检测器和 OSOR 检测器, 文献[10]提出的 MOS CFAR 和 mOS CFAR 两种检测器, 各检测器相关参数和给定虚警率下的检测门限 / 标称因子见表 1. 其中, CMLW CA 检测器传感器 1 (S_1) 和传感器 2 (S_2) 的删除单元数分别为 3 和 4

由于各传感器的信噪比决定了检测器的权值, 为说明所提出的检测器能用于各传感器在信噪比不

表1 虚警概率为 $P_{fa} = 10^{-6}$ 时
各检测器对应的标称因子

检测器	单元	秩	P_{fa}	T
COS	S_1	11	10^{-6}	23.64
	S_2	13		
OSOR	S_1	11	5×10^{-5}	$T_1 = 36.26$
	S_2	13	5×10^{-5}	$T_2 = 34.23$
OSAND	S_1	11	10^{-3}	$T_1 = 9.555$
	S_2	13	10^{-3}	$T_2 = 9.725$
MOS	S_1	11	10^{-6}	21.96
	S_2	13		
mOS	S_1	11	10^{-6}	47.30
	S_2	13		
CMLWCA	S_1	11	10^{-6}	12.34
	S_2	13		

同时的情况,图2给出了不同权值下CMLWCA检测器性能仿真结果,图3为相同权值下,几种检测器的检测性能比较,表2为图3对应的定量数值结果

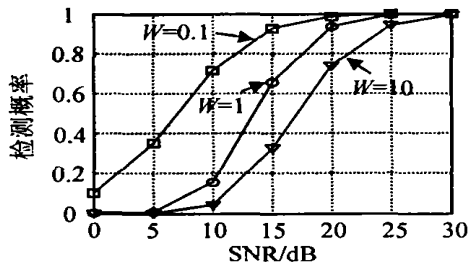


图2 不同权值下CMLWCA检测器
检测概率与信噪比之间的关系

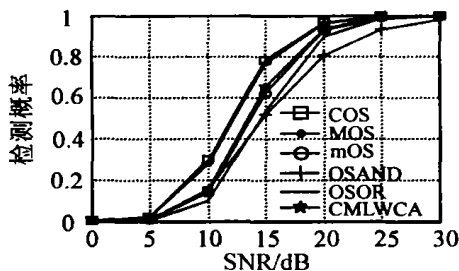


图3 当权值为1时,各检测器检测
概率与信噪比之间的关系

从图3和表2可以看出,CMLWCA检测器的性能优于传统的分布式CFAR检测器(OSAND, OSOR),并与mOS检测器相近,而比集中式检测器(COS CFAR)和MOS检测器差。但值得说明的是,虽然本文提出的检测器性能略差于COS CFAR和MOS检测器,但是从通信传输量上看,对于完成一次检测,COS需要从各传感器传输到信息中心传输的值为所有传感器参考单元和检测单元的所有值,MOS检测器或mOS需要从各传感器传输到信息中

表2 权值为1时各检测器在不
同信噪比下的检测概率 (dB)

SNR	5	10	15	20	25
COS	0.01	0.32	0.81	0.97	1.00
OSAND	0.01	0.16	0.54	0.82	0.93
OSOR	0.00	0.09	0.54	0.90	0.99
MOS	0.01	0.27	0.78	0.97	1.00
mOS	0.00	0.13	0.64	0.93	0.99
CMLWCA	0.00	0.15	0.67	0.94	0.99

心值为两个,一个是检测单元幅度,另一个是由参考单元估计到的噪声/杂波幅度;而CMLWCA检测器从各传感器传输到信息中心的值只需一个,即各传感器的信噪比/信杂比。因此,它完成检测所需的通信带宽远小于集中式处理,而为MOS检测器和mOS检测器的一半。此外,CMLWCA检测器可在各传感器信噪比不相同的情况下完成CFAR处理,而这一点是集中式CFAR检测和MOS检测器与mOS检测器不具备的。综上所述,CMLWCA检测器是一种良好的检测器。

4 结论

在似然比意义下,本文提出了一种新的分布式CFAR检测器——CMLWCA CFAR检测器,在噪声服从指数分布、目标为Swering II起伏情况下,导出了相应的虚警概率和检测概率闭式解。在推导过程中,由于没有限制各传感器中杂波/噪声必须满足相同的统计特性,各传感器之间不同的信噪比与权值的关系保持检测器的CFAR特性。此外,该检测器的通信带宽仅为文献[10]提出方法的一半,而检测性能却与其中的mOS检测器相当。因此,综合考虑,本文提出的方法具有一定的优越性,且更接近实际。

参考文献 (References)

- [1] 朱允民. 多传感器分布式统计判决[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
(Zhu Y M. *Multisensor Distributed Statistics Decision* [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2000.)
- [2] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 2-31.
(He Y, Guan J, Peng Y N, et al. *Automatic Radar Detection and False Alarm Rate Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing Company, 1999: 2-31.)
- [3] Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situation [J]. *IEEE Trans on AES*, 1983, 19(2): 608-621.

(下转第429页)

表 5 不同问题规模下算法 / 规则性能比较
和瓶颈分解算法 CPU 平均计算时间

问题 S (M, N)	启发式方法 H 的相对性能指标 $\rho(H, S)$								ACT
	BO T	FCFS	SPT	EDD	MOD	ATC	MPSK	BO T	
(10 50)	1.000	1.867	1.533	1.584	1.355	1.456	1.493	0.001	
(20 50)	1.000	1.497	1.344	1.474	1.326	1.382	1.327	0.002	
(30 50)	1.000	1.380	1.282	1.388	1.280	1.314	1.279	0.003	
(10 100)	1.000	2.580	2.071	1.616	1.370	1.514	1.914	0.005	
(20 100)	1.000	1.712	1.480	1.487	1.330	1.423	1.426	0.008	
(30 100)	1.000	1.513	1.361	1.430	1.310	1.379	1.329	0.010	
(10 200)	1.000	3.938	3.156	1.612	1.362	1.536	3.065	0.010	
(10 200)	1.000	2.134	1.813	1.486	1.318	1.443	1.748	0.030	
(10 300)	1.000	1.852	1.638	1.503	1.351	1.458	1.568	0.040	

越靠近瓶颈机中间位置, 瓶颈迭代的次数越多, CPU 计算时间越长 交货期限越松(滞后因子 T 取 0.1), 瓶颈分解算法的性能越好 由表 5 可知, 瓶颈分解算法的调度性能随着问题规模的增大相对性能指标提高, 而且该算法计算速度非常快(不超过 1s), 适用于大规模调度问题

5 结 论

本文针对大规模静态流水线调度问题, 提出了一种基于瓶颈的分解协调方法 该方法通过求解瓶颈机的调度问题, 降低了原问题的计算复杂度 仿真结果显示, 瓶颈分解算法优于列表调度算法, 它可在很短的时间内获得一个好的调度 同时关联项的估计对最终调度的影响很大, 到达时间和传递时间的修正方法尚有待改进 本文研究的对象是典型的流水线调度问题, 当考虑复杂情况, 如重入和批处理机

等, 则瓶颈机与非瓶颈机之间的协调方式需要进一步研究

参考文献(References)

- [1] Pinedo M. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*[M]. NJ: Prentice Hall, 1995.
- [2] Demirkol E, Mehta S V, Uzsoy R. A Computational Study of Shifting Bottleneck Procedures for Shop Scheduling Problems[J]. *J of Heuristic*, 1997, 3(2): 111-137.
- [3] Uzsoy R, Wang C S. Performance of Decomposition Procedures for Job Shop Scheduling Problems with Bottleneck Machines[J]. *Int J of Production Research*, 2000, 38(6): 1271-1286.
- [4] Sameer H, Chandrasekharan R. Scheduling in Flow-shops to Minimize Total Tardiness of Jobs[J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(12): 2289-2301.
- [5] 唐立新, 吴亚萍. 混合流水车间调度的遗传下降算法[J]. *自动化学报*, 2002, 28(4): 637-641.
(Tang L X, Wu Y P. A Genetic Descent Algorithm for Hybrid Flow Shop Scheduling[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(4): 637-641.)
- [6] Lee G G, Kim Y D, Choi S W. Bottleneck-focused Scheduling for a Hybrid Flow shop[J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(1): 165-181.
- [7] Zhang H Y, Xi Y G, Gu H Y. A Decomposition and Coordination Scheduling Method for Flow-shop Problem Based on TOC[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(2): 182-187.
- [8] Vepsalainen, A P J, Morton T E. Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs[J]. *Management Science*, 1987, 33(8): 1035-1047.

(上接第 424 页)

- [4] Gandhi P, Kassam S A. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background[J]. *IEEE Trans on A ES*, 1988, 24(2): 427-445.
- [5] Viswanathan R, Eftekhari A. A Selection and Estimation Test for Multiple Targets in Clutter Detection[J]. *IEEE Trans on A ES*, 1992, 28(1): 505-519.
- [6] Barkat M, Varshney P K. Adaptive Cell-averaging CFAR Detection in Distributed Sensor Networks[J]. *IEEE Trans on A ES*, 1991, 27(2): 424-429.
- [7] Ritcey J A. Analysis of the Censored Mean-level Detector[J]. *IEEE Trans on A ES*, 1986, 22(4): 443-454.

- [8] Uner M K, Varshney P K. Decentralized CFAR Detection Based on Order Statistics[A]. In *Proc of 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems* [C]. Detroit, 1993: 146-149.
- [9] Xiu Y H, Norihiko M, Toshihiko N. Direct Evaluation of Radar Detection Probabilities[J]. *IEEE Trans on A ES*, 1987, 23(4): 418-423.
- [10] Hamid A, Viswanathan R. A New Distributed Constant False Alarm Rate Detector[J]. *IEEE Trans on A ES*, 1997, 33(1): 85-97.