

# 高斯杂波中距离扩展目标的模糊 CFAR 检测

郝程鹏, 蔡 龙, 陈模江

(中国科学院声学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 为提高高分辨雷达的检测性能, 提出了一种高斯杂波背景下距离扩展目标的模糊检测方法。该方法采用模糊恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)检测器代替传统的二进制 CFAR 检测器, 将距离单元值转换成映射到虚警空间的模糊隶属函数值, 然后采用模糊积累准则进行积累, 得到检测统计量。研究了模糊代数积、模糊代数和两种积累准则, 推导出这两种方法虚警概率的数学解析式。仿真结果表明, 高斯杂波背景下模糊代数积积累较双门限二进制积累可获得近 2 dB 的性能改善。同时, 模糊检测方法只采用单个检测门限, 具有易于调节的优点。

**关键词:** 高分辨雷达; 距离扩展目标; 检测; 恒虚警; 隶属函数

**中图分类号:** TN 957. 51

**文献标志码:** A

## Fuzzy CFAR detection for range-extended targets in Gaussian clutter

HAO Cheng-peng, CAI Long, CHEN Mo-jiang

(Inst. of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to improve the detection performance of the high resolution radar (HRR), a new detection scheme of range-extended targets based on fuzzy logic is proposed. It computes the values of the membership function to the false alarm space from the samples of the reference cells by replacing the conventional binary constant false alarm rate (CFAR) detector with a fuzzy CFAR detector. Then these values are combined according to fuzzy integrators to produce a global detection statistic. The fuzzy algebraic sum integrator and the fuzzy algebraic product integrator are considered, and the analytic expressions of the false alarm rate for them are derived. Simulation results show that the fuzzy algebraic product integrator renders nearly 2 dB improvement of SNR over the binary integrator in Gaussian clutter. In addition, these fuzzy integrators have the characteristic that the false alarm rate can be tuned using a single threshold, more easily than that of the dual-threshold binary integrator.

**Keywords:** high resolution radar (HRR); range-extended target; detection; constant false alarm rate (CFAR); membership function

## 0 引言

随着雷达理论和技术的发展, 宽带高分辨雷达的距离分辨已小于目标的尺寸, 目标回波已不具有点目标回波的特征, 目标回波为目标冲激响应与发射信号的卷积, 它在径向方向上连续占据多个距离分辨单元, 称为距离扩展目标<sup>[1]</sup>。它的检测可以采用低分辨雷达的二进制积累方法来解决<sup>[2]</sup>, 文献[3]系统地研究了基于二进制积累的距离扩展目标检测方法在高斯背景下的检测性能, 文献[4]进一步研究了该方法在 Weibull 杂波背景下的性能。结果表明, 该方法较常规低分辨雷达方法可获得性能上的大大改善。

模糊检测能够有效扩大信号的检测域, 解决了传统 CFAR 检测没有充分利用观测信息的问题, 提高了检测性能。国外学者对模糊 CFAR 检测进行了初步研究<sup>[5-6]</sup>, 文献[5]将固定门限值替换为一个由隶属函数实现的软连续门限值, 文献[6]提出了模糊积累概念, 实现了杂波功率确切情况下的多脉冲检测, 并对模糊  $N$  中选  $k$  检测准则进行了研究。本文将模糊检测方法应用到高分辨雷达检测中, 提出了一种新的距离扩展目标检测方法, 研究了模糊代数积、模糊代数和两种积累准则, 设计了高斯杂波功率未知情况下将观测值映射到虚警空间的隶属函数, 推导出虚警概率的数学解析表达式, 并与二进制积累进行了比较分析。

收稿日期: 2008-11-06; 修回日期: 2009-03-14。

基金项目: 国家自然科学基金(60802072)资助课题

作者简介: 郝程鹏(1975-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为信号检测与多传感器数据融合。E-mail: haochengp@sohu.com

### 1 距离扩展目标的二进制积累检测方法

高分辨雷达的目标回波会连续占据多个径向距离分辨单元,所以将多脉冲检测中使用的二进制积累检测方法应用于高分辨雷达的目标检测,可以有效改善高分辨雷达的检测性能<sup>[7]</sup>。高斯背景下距离扩展目标的二进制积累检测方法基本假设如下:

- (1) 雷达回波信号经过平方律检波后,其输出是沿距离向对分辨单元的采样。
- (2) 无目标时,样本幅值服从指数分布。
- (3) 信号起伏模型在形式上与 Swerling II 型相同,但 Swerling II 型考虑的是同一目标在相邻脉冲间相互独立,而这里考虑的是同一脉冲作用于多个相邻的距离分辨单元,回波信号间相互独立。
- (4) 检测针对单个脉冲进行,对每个距离分辨单元采用常规 CFAR 检测方法实施第一门限检测,虚警概率设为  $P_{fa1}$ ,然后采用二进制积累方法实施二次检测,若在  $S$  次检测中发生  $L$  次以上检测成功,则认为目标出现, $S$  值应与目标长度相适应, $L$  为第二检测门限。

(5) 第一门限检测在设置参考滑窗时需设置较多的“保护单元”,在检测单元两侧均应有  $S$  个距离分辨单元被剔除掉,视为“保护单元”不参加背景功率水平的估计。

在上述假设下,距离扩展目标的二进制积累检测方法的累积虚警概率为

$$P_{fa} = \sum_{k=L}^S C_S^k P_{fa1}^k (1 - P_{fa1})^{S-k} \quad (1)$$

有序统计 (order statistics, OS)-CFAR 检测器由文献<sup>[8]</sup>提出,用于处理多目标情况,其原理图如图 1 所示。

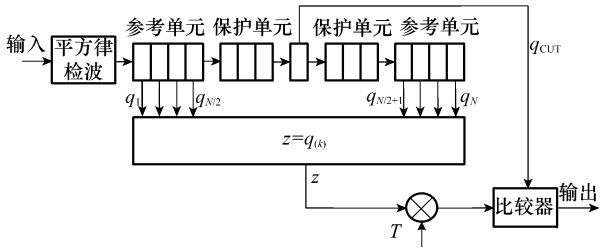


图 1 OS-CFAR 检测器原理框图

图中,  $q_{CUT}$  为检测单元,  $\{q_{(1)}, q_{(2)}, \dots, q_{(N)}\}$  为参考距离单元  $\{q_1, q_2, \dots, q_N\}$  按幅值由小到大排序后的序列,背景功率水平估计  $z = q_{(k)}$ ,自适应判决准则为  $q_{CUT} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} Tz$ 。高斯背景下 OS-CFAR 的虚警概率和检测概率分别为

$$P_{fa1}^{OS} = P(q_{CUT} > Tz | H_0) = \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T} \quad (2)$$

$$P_{d1}^{OS} = P(q_{CUT} > Tz | H_1) = \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T/(1+\lambda)} \quad (3)$$

式中,  $H_1$  表示目标存在;  $H_0$  表示目标不存在;  $T$  是根据设定的虚警概率和相应的 CFAR 方法所确定的门限系数;  $\lambda$  是信号能量与噪声的平均功率之比。

若第一门限检测采用 OS-CFAR 检测器,则基于 OS-CFAR 的距离扩展目标检测方法的累积虚警概率和累积检测概率为

$$P_{fa} = \sum_{j=L}^S C_S^j \left( \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T} \right)^j \times \left( 1 - \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T} \right)^{S-j} \quad (4)$$

$$P_d = \sum_{j=L}^S C_S^j \left( \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T/(1+\lambda)} \right)^j \times \left( 1 - \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+T/(1+\lambda)} \right)^{S-j} \quad (5)$$

### 2 基于模糊逻辑的 CFAR 方法

文献<sup>[5-6]</sup>中的模糊检测器定义了隶属函数  $\omega$ ,它将观测空间映射为一个介于 0 和 1 之间的值,该值表征“无信号”和“有信号”假设成立的程度, $\omega$  定义为

$$\omega(y_i) = P(Z > y_i | Z \in N(0, \sigma^2)) \quad (6)$$

式中,  $y_i$  为服从高斯分布的观测值。“无目标”假设下,强参考单元值被赋予小的隶属度,因此隶属函数随参考单元强度增加而单调递减。若  $\omega(y_i)$  小于门限值,则声明目标存在。在这里,考虑杂波功率水平未知的情况,此时门限值是自适应的,定义如下隶属函数更有意义

$$\omega(x) = P(X > x | H_0) = 1 - F_X(x) \quad (7)$$

式中,  $x = q_{CUT}/z$ ; 随机变量  $X$  定义为  $X = Q_{CUT}/Z$ ;  $Q_{CUT}$  和  $Z$  分别为  $q_{CUT}$  和  $z$  对应的随机变量;  $F_X(x)$  为  $X$  的积累分布函数。所以,  $\omega(x)$  是一个单调递减函数,若满足  $\omega(x)$  小于门限值,则声明目标存在。由文献<sup>[9]</sup>可知,对任意连续随机变量应用累积分布函数形成的随机变量均匀分布于  $[0, 1]$ ,因此隶属函数  $\omega(x)$  均匀分布于  $[0, 1]$ 。比较式(7)和式(2)可知,将式(2)中的  $T$  换成  $x$ ,就得到了高斯背景下模糊 CFAR 检测器的隶属函数。对于 OS-CFAR,有

$$\omega_{OS}(x) = \prod_{i=0}^{k-1} \frac{N-i}{N-i+x} \quad (8)$$

高斯背景下检测器的原理框图如图 2 所示。

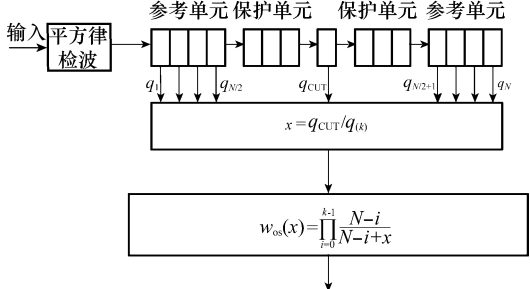


图 2 高斯背景下模糊 OS-CFAR 检测器原理框图

### 3 距离扩展目标的模糊检测方法

距离扩展目标的模糊检测方法是在第一门限检测中用模糊 CFAR 检测器代替传统的二进制 CFAR 检测器,将距离单元值转换成映射到虚警空间的模糊隶属函数值  $\omega(x_i)$  ( $i=1,2,\dots,S$ ),然后采用模糊积累准则对这些隶属函数值进行累积,得到检测统计量。相对于二进制积累,模糊积累更能充分利用观测信息,提高高分辨雷达的检测性能。采用不同的模糊积累准则,就会得到不同的检测方法,本文考虑两种常用的积累准则,分别是模糊代数积积累和模糊代数数和积累。下面推导这两种方法平均虚警概率的数学解析式。

#### 3.1 模糊代数数和

$$P_{fa}^{sum} = P\left(\sum_{i=1}^S \omega(x_i) \leq T\right) \quad (9)$$

无目标时,  $\omega(x_i)$  服从  $[0,1]$  之间的均匀分布,所以  $\sum_{i=1}^S \omega(x_i)$  的分布是  $S$  个均匀分布的卷积,其概率分布函数<sup>[6]</sup>为

$$F(z) = \sum_{j=0}^z (-1)^j C_S^j \frac{(z-j)^S}{S!} \quad (10)$$

$$P_{fa}^{sum} = F(T) = \sum_{j=0}^T (-1)^j C_S^j \frac{(T-j)^S}{S!} \quad (11)$$

根据式(11),可得  $P_{fa}^{sum}$  和  $T$  的函数关系曲线,如图 3 所示。根据图 3 和预设定的虚警概率,可以很方便地求出门限系数  $T$ 。

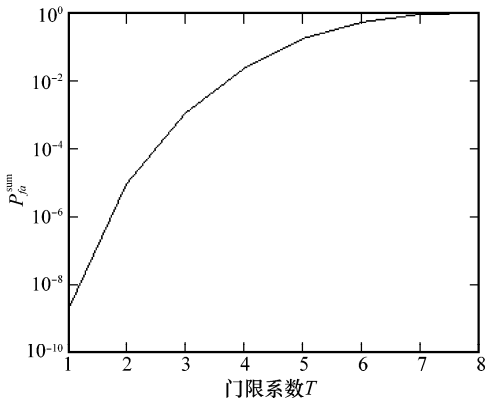


图 3  $P_{fa}^{sum}$  和  $T$  的函数关系曲线

#### 3.2 模糊代数积

$$P_{fa}^{prd} = P\left(\prod_{i=1}^S \omega(x_i) \leq T\right) \quad (12)$$

$S$  个均匀分布随机变量积的概率密度函数<sup>[10]</sup>为

$$f(z) = (-1)^{S-1} \frac{1}{(S-1)!} (\ln z)^{S-1} \quad (13)$$

另外,有

$$\int_0^u (\ln z)^n dz = \sum_{j=0}^n (-1)^j \frac{n!}{(n-j)!} u (\ln u)^{n-j} \quad (14)$$

所以,模糊代数积积累的虚警概率为

$$P_{fa}^{prd} = \int_{-\infty}^T f(z) dz = (-1)^{S-1} \frac{1}{(S-1)!} \int_0^T (\ln z)^{S-1} dz = (-1)^{S-1} \sum_{j=0}^{S-1} (-1)^j \times \frac{1}{(S-1-j)!} T (\ln T)^{S-1-j} \quad (15)$$

图 4 给出了  $P_{fa}^{prd}$  和  $T$  的函数关系曲线,根据图 4 和预设定的虚警概率,可以很方便地求出检测门限  $T$ 。由式(1)可知,二进制积累方法的虚警概率由  $T$  和  $L$  两个门限及杂波分布确定,而由式(11)和式(15)可知,模糊检测方法的虚警概率只由  $T$  决定,易于调节,并具有更广泛的杂波适应性。

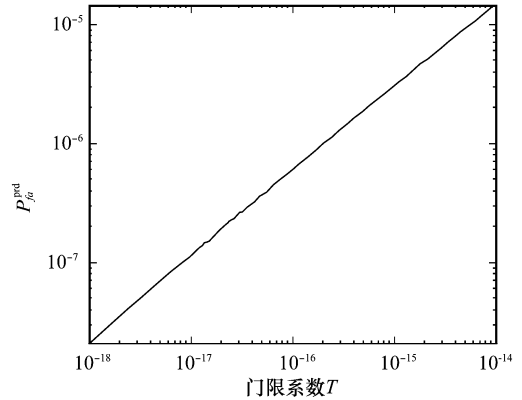


图 4  $P_{fa}^{prd}$  和  $T$  的函数关系曲线

### 4 性能分析

通过仿真实验,分析模糊检测方法的性能,并与二进制积累进行比较。相关参数的设置为:第一门限检测采用 OS-CFAR 检测器,参考滑窗长度  $N=32$ ,序值  $k=24$ ,预设定的虚警概率  $P_{fa} = 10^{-6}$ ,目标所占据的单元数  $S=12$ ,二进制积累采用 5/12 积累准则。为了给出模糊检测方法的 CFAR 损失,还分析了背景杂波平均功率已知、第一门限检测采用最优检测时模糊代数积方法的性能,仿真结果如图 5 所示。

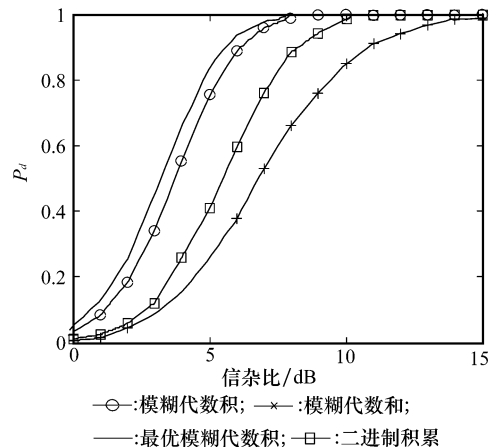


图 5 不同检测方法检测性能的比较

从图 5 可以看出,为满足检测概率  $P_d=0.5$ ,最优积累和模糊代数积积累所需的信杂比分别仅为 3.11 dB 和

3.49 dB,而二进制积累、模糊代数和积累所需的信杂比则分别为 5.39 dB 和 6.82 dB。可见,在当前检测条件下,模糊代数积累方法较双门限二进制积累方法可获得近 2 dB 的性能改善,而相对于最优积累,其 CFAR 损失只有 0.38 dB。这是因为对于起伏模型目标的检测,模糊代数积累比二进制积累和模糊代数和积累更能充分利用观测信息,具有最为合理的检测域<sup>[5,11]</sup>。

为了更直观、简明地说明问题,给出了  $S=2$  时 3 种积累方法的二维检测空间,如图 6 所示。其中,二进制积累采用  $1/2$  积累准则,预设定的虚警概率  $P_{fa}=0.1$ ,横、纵坐标分别为两个距离单元所对应的隶属函数值  $w(x_1)$  和  $w(x_2)$ 。

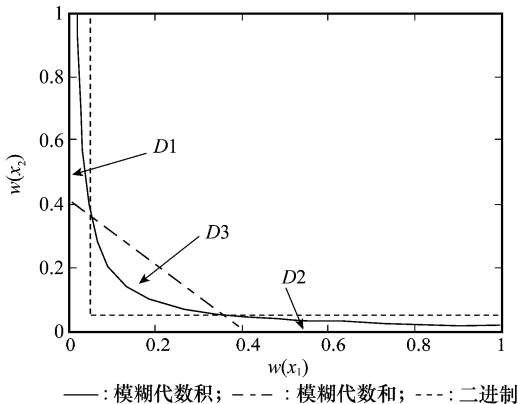


图 6 3 种积累方法的二维检测空间

从图 6 可以看出:

(1) 二进制积累的检测域是  $w(x_1)$  和  $w(x_2)$  差异大的区域。

(2) 模糊代数和积累的检测域是  $w(x_1)$  和  $w(x_2)$  差异小的区域。

(3) 模糊代数积累的检测域是以上二者的折中,最为合理。

对于起伏模型的目标,  $w(x_1)$  和  $w(x_2)$  的差异性更大,落入区域 D1 和 D2 的概率大一些,此时模糊代数积累和二进制积累的性能优于模糊代数和积累。而模糊代数积累的检测域同时兼顾了  $w(x_1)$  和  $w(x_2)$  差异小的区域,必然具有最好的性能。

另外,对于非起伏模型的目标,  $w(x_1)$  和  $w(x_2)$  落入区域 D3 的可能性更大,此时模糊代数和积累的性能会更好,其次是模糊代数积累,二进制积累最差。所以,应根据目标起伏模型的不同,选用最适当的模糊积累准则进行检测,以期获得最大限度的性能提升。

## 5 结束语

本文基于模糊逻辑提出了一种高斯杂波背景下距离扩展目标的 CFAR 检测方法;分析了第一门限检测采用模糊 OS-CFAR,后积累分别采用模糊代数积累、模糊代数和积累时该方法的检测性能。结果表明,采用模糊代数积累方案较双门限二进制积累方法可带来近 2 dB 的性能改善,有效提高了高分辨雷达的检测性能。

针对具体的雷达检测环境,其他模糊 CFAR 检测方案,如模糊单元平均、模糊删除平均等方法也可用于第一门限检测。该方法在其他非高斯杂波背景下的检测性能还有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Van Trees H L. *Detection, estimation and modulation theory* [M]. New York: John Wiley, 1971.
- [2] 唐劲松. 高分辨雷达目标检测与识别[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1996.
- [3] 孟祥伟, 曲东才, 何友. 高斯背景下距离扩展目标的恒虚警检测[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(6): 1012-1015. (Meng Xiangwei, Qu Dongcai, He You. CFAR detection for range-extended target in Gaussian background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(6): 1012-1015.)
- [4] 蔡春, 杨军, 秦江敏. Weibull 杂波背景下扩展目标的恒虚警率检测[J]. 空军雷达学院学报, 2006, 20(2): 111-113.
- [5] Leung S W, Minett J W. The use of fuzzy spaces in signal detection[J]. *Fuzzy Sets Systems*, 2000, 114(2): 175-184.
- [6] Leung S W, Minett J W. A fuzzy approach to signal integration [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 346-351.
- [7] Soltani F, Batkat M. CFAR binary integration detection in non-homogeneous partially correlated clutter [C] // *Proc. of IEE Radar, Sonar and Navigation*, 1997, 144(5): 293-300.
- [8] Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1983, 19(4): 608-621.
- [9] Papoulis A. *Probability, random variables and stochastic processes* [M]. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [10] 曲超. 普通声纳恒虚警检测方法研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2008.
- [11] Hammoudi Z, Soltani F. Distributed CA-CFAR and OS-CFAR detection using fuzzy spaces and fuzzy fusion rules [C] // *Proc. of IEE Radar, Sonar and Navigation*, 2004, 151(3): 135-142.