

# 基于杂波跟踪的 CFAR 检测研究

张 弓, 朱兆达

(南京航空航天大学电子工程系, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 通过设立专门通道将图像处理技术应用于雷达检测域杂波功率数据处理, 对特征杂波进行跟踪, 为恒虚警处理提供背景信息. 本文介绍了对抗杂波边缘的自适应 CFAR 检测器设计中的研究工作, 设计了基于杂波跟踪的杂波属性 CF(clutter feature)-CFAR 检测器和结构元素 SE(structuring element)-CFAR 检测器, 对其检测性能进行了分析, 并通过蒙特卡罗 (Monte Carlo) 仿真方法对上述两种检测器的检测性能进行了仿真.

**关键词:** CFAR; 杂波跟踪; 图像处理; 蒙特卡罗方法

**中图分类号:** TN957. 51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1824-04

## Research on CFAR Based on Clutter Tracking

ZHANG Gong, ZHU Zhao-da

(Dept of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** The image processing was applied on the clutter data in radar detection region. This method can track the characterized clutter and offer information for CFAR. This paper introduced the research work on adaptive CFAR detectors confronting the clutter edge. Based on clutter tracking, we proposed CF(clutter feature)-CFAR detector and SE(structuring element)-CFAR detector, analyzed and simulated their detection performance by the Monte Carlo method.

**Key words:** CFAR; clutter tracking; image process; the Monte Carlo method

## 1 引言

雷达的自动检测, 通常是借助于与检测单元邻近的距离或多普勒频率单元中的杂波加噪声的平均功率的估计来实现的. 这种过程在许多噪声和杂波条件下提供了接近最优的信号检测性能的同时也保持了恒定的虚警率. 这种方法本身就是自适应的. 然而, 在参考滑窗中出现干扰目标回波、杂波边缘时, 将引起检测阈值的变化, CFAR 检测器就不能再保持最优检测性能. 如 CA, CO, OS 等 CFAR 检测器<sup>[1]</sup>. 其中所形成杂波电平估计  $Z$  的方法所涉及的选择逻辑、算法和有关参数都是固定的. 为了提高 OS 在杂波边缘环境中的性能, 出现了一类既能自适应于干扰目标数和分布情况的变化, 又可自适应于杂波边缘位置变化的 CFAR 检测器. 这些自适应 CFAR 检测器在不同程度上克服了以往一些典型 CFAR 方法在非均匀干扰背景中性能下降的问题. 它们都是在检测过程中, 结合检测器的构造对杂波的边缘进行估计, 有各自的优势, 能在特定的环境中获得增强的性能. 但是这些方法还不能在所有干扰环境中都具有稳健性, 并且算法往往是很复杂的, 因此在工程实现上难度较大, 有必要对此类方法做进一步研究. 鉴于上述自适应 CFAR 检测器中在检测过程对杂波边缘估计的不足, 我们结合图像处理技术实现杂波跟踪<sup>[2,3]</sup>的方法提供对杂波边缘的估计结果, 设计了相应的基于杂波跟踪的 CFAR 检测器.

## 2 杂波属性 CFAR 检测器

### 2.1 杂波属性 CFAR 检测器原理

杂波属性 CF-CFAR 检测器是基于图像处理技术得到关于杂波边缘的跟踪结果而提出的一种抗杂波边缘的一维 CFAR 检测器, 如采用局部熵法对杂波边缘跟踪<sup>[3]</sup>. 由于该类杂波跟踪的结果, 仅反映杂波的边缘, 对此, 我们提出了利用非均匀杂波边缘信息的 CFAR 检测器. 首先它根据局部熵法杂波跟踪结果判断杂波边缘是否进入参考单元; 当杂波边缘进入参考单元, 由检测单元处的杂波属性决定参与构成杂波电平估计  $Z$  的参考单元, 即由与检测单元的同杂波属性的参考单元构成, 参考单元数为  $2n$ . 设局部熵法杂波跟踪结果为二值数组 (除去主瓣杂波和高度线杂波), 1: 杂波边缘, 0: 非杂波边缘. 随着检测滑窗的移动, 当杂波边缘进入时, 检测滑窗内的值不再全为 0, 存在着连续为 0 的单元数大于  $n$  的一段, 段内的采样值属于同一杂波属性, 且此段必定包含了检测单元, 因而, 可选择与检测单元同属性一侧的参考单元所对应的  $X$  或  $Y$  为杂波电平估计  $Z$ .

假设杂波服从高斯分布, 在平方律检波条件下, 检测包络服从指数分布. 在杂波边缘环境中, 我们只考虑虚警, 与目标模型无关. 假设杂波功率有一个阶跃, 检测及参考单元采样的 PDF 为:

$$f(x) = \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu} \quad (1)$$

其中,平均功率水平  $\mu$  代表弱杂波区  $H_N$ ,  $\mu$  代表强杂波区  $H_C$ . 是两区域杂波功率水平之比. 设强杂波区占据的单元数为  $N_C$ ,其余的  $R - N_C$  个单元是  $H_N$  情形.

$$\max\{(R - N_C), N_C\} = \begin{cases} N_C, & \text{检测单元属于 } H_C \\ R - N_C, & \text{检测单元属于 } H_N \end{cases} \quad (2)$$

由上式确定了杂波属性后,将检测单元与其同属性的参考单元构成的检测器等效于均匀杂波噪声背景中的单元平均 CFAR 检测器. 因而,其检测概率<sup>[1]</sup>

$$P_d = [1 + T/(1 + \gamma)]^{-n} \quad (3)$$

$T$  为标称化因子,  $\gamma$  为信杂比,  $n = R/2$ , 在  $\gamma = 0$  时,有:

$$T = (P_{fa})^{-1/n} - 1 \quad (4)$$

从理论上分析可知,杂波属性 CFAR 检测器是一种适用于处理杂波边缘检测的恒虚警检测器,在对杂波边缘精确跟踪的条件下,参考单元数为  $2n$  的 CF-CFAR 检测器,其性能可以达到均匀杂波噪声背景中的参考单元数为  $n$  的 CA-CFAR 检测器的检测性能.

## 2.2 分析与仿真

在工程应用中分析恒虚警性能常采用蒙特卡罗方法,为了减小试验方差,可采用一些相关的方法如:修改抽样过程、解析方法、重要抽样法、分层抽样法等,这些方法都需要对模拟过程知识的掌握,这一点又限制了这些方法在实际工程中的应用. 在恒虚警检测中,当参考单元采样服从指数分布条件下,检测单元的噪声电平  $Y_0$ 、杂波电平估计  $Z$  的 PDF 函数  $p_z(Z)$ 、门限因子  $T$  与虚警概率  $P_{fa}$  有如下的关系:

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P[Y_0 - TZ] = \int_0^\infty P(Y_0 - TZ) p_z(Z) dZ \\ &= \int_0^\infty e^{-TZ/\mu} p_z(Z) dZ \end{aligned} \quad (5)$$

文献[4]在分析一种 MEMO-CFAR 检测器的性能时,对式(5)进行变形:

$$P_{fa} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{TZ(i)}{\mu}\right) \quad (6)$$

利用蒙特卡罗方法对式(6)进行仿真,只用了 50,000 次服从指数分布的随机数作为输入,得到了与理论值非常吻合的结果. 该方法不需要知道或推导  $p_z(Z)$ , 并且有很高的仿真效率,是一种有实用价值的方法. 我们在对 CF-CFAR 检测器和下述的 SE-CFAR 检测器的性能分析中都采用了这种方法.

杂波边缘描述的是在特性完全不同的背景区域间的过渡区情况,这种情况的典型例子是降雨区的边缘. 如果检测单元处于强杂波区,而其它一些参考单元处于弱杂波区,那么 CA 的虚警率会急剧上升. 而 CO 作为 CA 的修正型可以在杂波边缘环境中较好地控制虚警率. 如果检测单元处于弱杂波区,而其它一些参考单元处于强杂波区,那么即使信噪比很大也将产生覆盖效应,CA 和 CO 的  $P_d$  和  $P_{fa}$  都会下降<sup>[5]</sup>. 文献[6]给出了 CA、CO、SO-CFAR 在杂波边缘环境中虚警率的精确解析表达式. 为了进一步从工程应用角度对 CF-CFAR 在杂波边缘环境中控制虚警能力的分析,我们对其进行蒙特卡罗仿真,

仿真次数  $N = 10^5$ , 图 1 给出的是 CA、CO、CF-CFAR 检测器在  $P_{fa} = 10^{-6}$ ,  $R = 16$  时的 3 组值杂波边缘环境中的性能曲线,横坐标是被强杂波占据的参考单元数. 随着  $N_C$  的增加,也就是杂波边缘由参考滑窗左边向右边滑动,  $P_{fa}$  首先是下降,在杂波边缘扫过检测单元时,  $P_{fa}$  有一个跳跃,形成一个“虚警尖峰”. “虚警尖峰”低说明 CFAR 检测器的虚警控制能力强. 从图中可以看出,CO 的虚警控制能力优于 CA,而 CF 的虚警控制能力优于 CA 和 CO,在整个杂波边缘区其  $P_{fa}$  几乎保持恒定,并且对  $N_C$  的变化不敏感,而 CA、CO 在  $N_C = 15$  dB 时尖峰升高了约 3~5 个数量级.

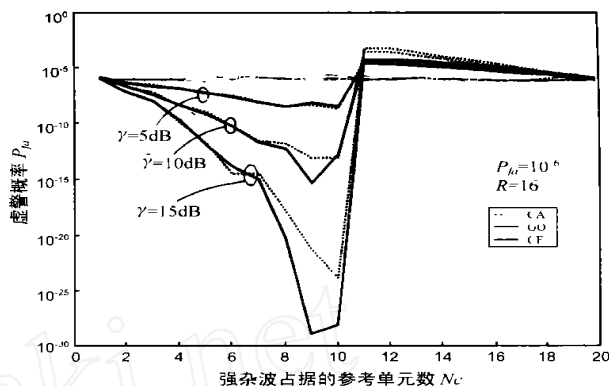


图 1 CA、CO 和 CF 检测器抗杂波边缘性能

图 2 给出了 CF-CFAR 和 CA-CFAR 检测设计在  $P_{fa} = 10^{-6}$  和  $R = 16$  时的检测概率  $P_d$  与实际  $N_C$  值的关系比较,CF-CFAR 避免了在弱杂波区由于覆盖效应造成的像 CA-CFAR 那样的检测性能下降,而在强杂波区,由于 CA-CFAR 方法中参与杂波功率水平估计的参考单元数大于 CF-CFAR 方法中参与杂波功率水平估计的参考单元数,CA-CFAR 的检测概率  $P_d$  优于 CF-CFAR;由图 2 可见,CF-CFAR 的检测概率  $P_d$  作为  $N_C$  的函数保持了相对的恒定,具有良好的抗杂波边缘特性.

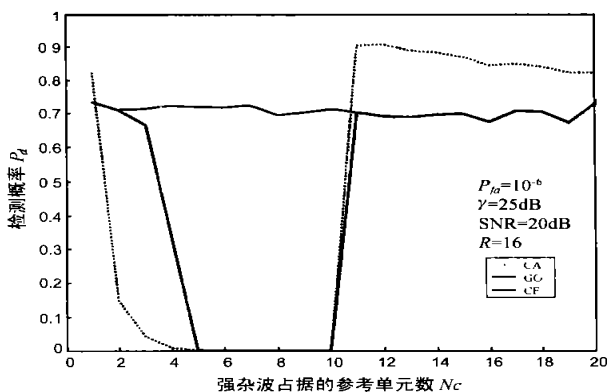


图 2 CF-CFAR 和 CA-CFAR 检测的  $P_d$  与  $N_C$  的关系比较 (SNR = 20dB)

## 3 结构元素 CFAR 检测器

### 3.1 结构元素 CFAR 检测器原理

文献[2]讨论了采用模糊 C 均值法对杂波进行跟踪的研究,通过对杂波功率特征阈值化处理,得到了经阈值分割后的

杂波跟踪结果. 这种跟踪结果与采用杂波边缘跟踪结果比较, 都可以剔除主瓣杂波、高度线杂波, 而采用模糊 C 均值法的杂波跟踪结果不仅可以反映强、弱杂波边缘, 还可以反映强、弱杂波的位置. 基于模糊 C 均值法的杂波跟踪结果, 我们提出了结构元素 SE-CFAR 检测器.

结构元素 SE-CFAR 检测器是一种二维单元平均检测器的改进形式, 它利用模糊 C 均值法的杂波跟踪结果对二维滑窗进行结构修正, 按修正后的结构元素对杂波参考单元取值, 并实时调整门限因子进行判决. 其原理框图如图 3 所示.

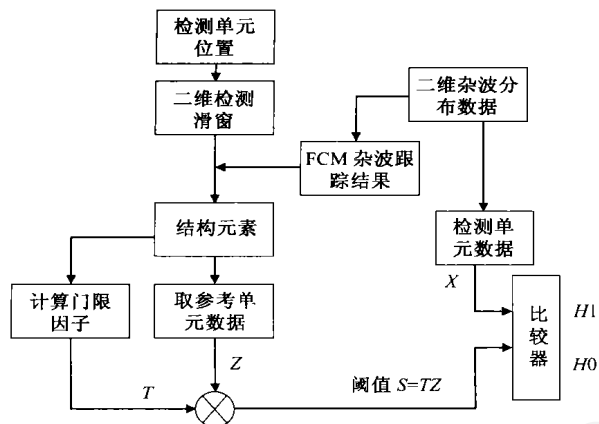


图 3 结构元素 SE-CFAR 检测器原理框图

其中  $X$  是检测单元采样. 设模糊 C 均值法杂波跟踪结果为二值数组 (除去主瓣杂波和高度线杂波), 1: 强杂波区, 0: 弱杂波区. 检测滑窗内的杂波跟踪值 (1 或 0) 随着检测滑窗的移动而变化 (图 4) 用于构成检测结构元素, 而检测滑窗内各单

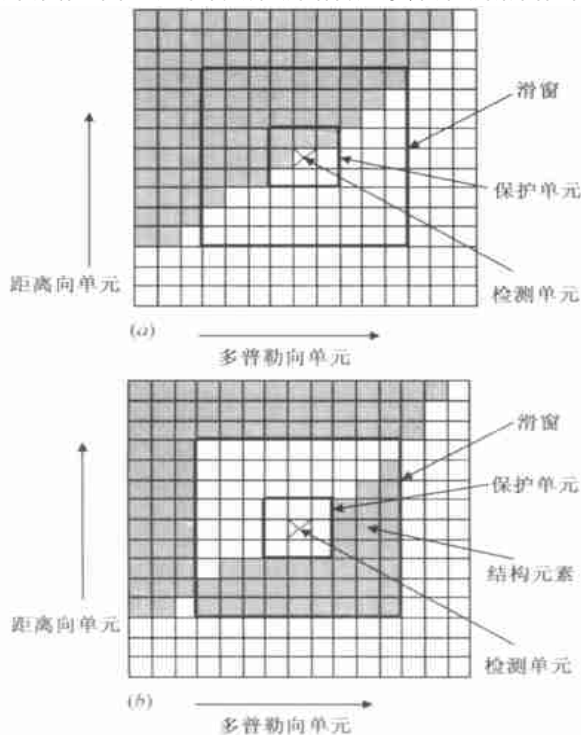


图 4 (a) 检测滑窗位置图; (b) 检测结构元素

元的杂波用于形成杂波电平估计  $Z$ .

(1) 计检测滑窗  $(2n+1) \times (2n-1)$  的结构和大小, 设置相应的保护单元;

(2) 根据检测单元处的杂波跟踪结果决定参加杂波功率水平估计的参考单元为强杂波区或弱杂波区. 对相应的滑窗中的杂波跟踪结果保持或取反 (图 4);

(3) 将 2 中滑窗中的杂波跟踪结果与 1 中设计的检测滑窗结构相与, 得到结构元素 (图 4(b));

(4) 计算结构元素中为 1 的单元数, 在不同的杂波分布 (如韦布尔分布, 对数-正态分布) 下, 可根据 CA-CFAR 虚警概率  $P_{fa}$  与门限因子  $T$  的相应关系式计算门限因子;

(5) 利用 3 中的结构元素对二维杂波分布取数据, 求杂波功率电平估计  $Z$ ;

(6) 将检测单元采样  $X$  与阈值  $S = TZ$  比较, 进行恒虚警检测.

### 3.2 分析与仿真

由于 SE-CFAR 检测器是一种抗杂波边缘的二维 CFAR 检测器, 在精确跟踪杂波的条件下, 该检测器实际是等效于一个滑窗结构、参考单元数随检测点位置而变化的 CA-CFAR 检测器, 因而它在多目标情况下对主目标的检测性能与 CF-CFAR 检测器相似.

假设存在与前节相同的条件, 对于杂波边缘情况下的检测, 如果检测单元处于强杂波区, 而其它一些参考单元处于弱杂波区, 那么 CA-CFAR 的虚警概率会急剧上升. 而 SE 作为 CA 的修正型可以在杂波边缘环境中较好地控制虚警率. 如果检测单元处于弱杂波区, 而其它一些参考单元处于强杂波区, 那么即使信噪比很大也将产生覆盖效应, CA-CFAR 的  $P_d$  和  $P_{fa}$  都会下降. 而 SE-CFAR 检测器因实时调整参考单元的结构, 其  $P_d$  和  $P_{fa}$  可以保持稳定, 表现出良好的抗杂波边缘特性.

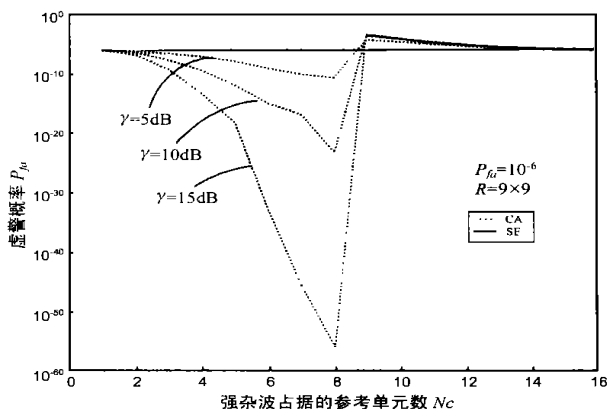


图 5 CA 和 SE 检测器抗杂波边缘性能

对其进行蒙特卡罗仿真, 仿真次数  $N = 10^4$ , 图 6 给出了 SE-CFAR 和 CA-CFAR 检测器设计在  $P_{fa} = 10^{-6}$  和  $R = 9 \times 9$  时的检测概率  $P_d$  与实际  $N_c$  值的关系比较, SE-CFAR 避免了在弱杂波区由于覆盖效应造成的像 CA-CFAR 那样的检测性能下降, 而在强杂波区, 由于 CA-CFAR 方法中参与杂波功率水平估计的参考单元数大于 SE-CFAR 方法中参与杂波功率水

平估计的参考单元数, CA-CFAR 的检测概率  $P_d$  优于 SE-CFAR; 由图 6 可见, SE-CFAR 的检测概率  $P_d$  作为  $N_c$  的函数保持了相对的恒定, 具有良好的抗杂波边缘特性。

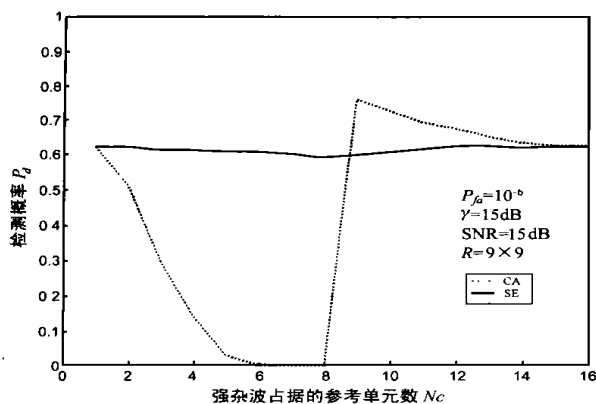


图 6 SE-CFAR 和 CA-CFAR 检测的  $P_d$  与  $N_c$  的关系比较  
(SNR = 15dB)

#### 4 结论

CF-CFAR 检测器和 SE-CFAR 检测器是分别基于两种杂波跟踪(模糊 C 均值法和最大熵法)结果的 CFAR 检测器, 在应用中存在着下列不同:

(1) 参考单元结构不同. 由于采用不同的杂波跟踪结果决定了两种不同的参考单元结构;

(2) 应用领域不同. CF-CFAR 检测器是一维 CFAR 处理方案, 可用于时域或频域检测, SE-CFAR 检测器是二维 CFAR 处理方案, 更适合于 PD 体制雷达的 CFAR 检测;

(3) 运算效率不同. 与 CF-CFAR 检测器比较, SE-CFAR 检测器采用二维 CFAR 处理方案, 而且其所需的杂波跟踪算法模糊 C 均值法运算量也较大, SE-CFAR 检测器的运算量大于 CF-CFAR 检测器。

从本质上说, 它们都是参考单元数可变的 CA 检测器, 而参考单元数的变化是随杂波跟踪结果而变化. 除杂波跟踪算法需增加的运算量外, 在相同的滑窗尺寸条件下, 其运算量大于 CF-CFAR 检测器, 尽管如此, 该恒虚警检测方法在对抗杂波边缘方面具有良好的性能, 是值得进一步在工程应用中研

究的方法。

#### 参考文献:

- [1] Finn H M, Johnson R S. Adaptive detection mode with threshold control as a function of spatially sampled clutter-level estimates[J]. RCA Review, 1968, 29: 414 - 464.
- [2] Zhang Gong, ZHU Zhao-da. Application of fuzzy C-mean cluster algorithm on clutter tracking[J]. Chinese Journal of Aeronautics, February 2002, 15(1): 44 - 48.
- [3] 张弓, 朱兆达, 周亦南. 局部熵算法在机载 PD 雷达杂波跟踪中应用[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1295 - 1298.
- [4] Anastassopoulos V, Lampropoulos G. A New and Robust CFAR Detection Algorithm[J]. IEEE Trans on AES, 1992, 28(2): 420 - 427.
- [5] Moore J D, Lawrence N B. Comparison of two CFAR methods used with square law detection of swerling I targets[A]. IEEE International Radar Conference[C]. Virginia: IEEE Aerospace and Electronic System Society, 1980. 403 - 409.
- [6] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background[J]. Trans on AES, 1988, 24(4): 427 - 445.

#### 作者简介:



张 弓 男, 1964 年 2 月生于安徽蚌埠, 1990 年毕业于哈尔滨船舶工程学院获通信与电子系统专业硕士, 2002 年于南京航空航天大学获通信与信息系统专业博士学位, 现为南京航空航天大学电子工程系副教授, 主要从事信号处理、雷达成像、通信电路方面的教学和科研工作。



朱兆达 男, 1939 年 3 月生于山东青岛, 1960 年毕业于南京航空学院, 现为南京航空航天大学电子工程系教授、博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 研究方向为: 雷达信号检测与处理。