

基于最大似然差的智能恒虚警检测器

张仁李, 盛卫星, 马晓峰

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了增强恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测器在杂波边缘环境中的鲁棒性, 结合无偏非均匀杂波估计 CFAR(HCE-CFAR)检测器检测概率高和可变性指示 CFAR(VI-CFAR)检测器虚警控制能力强的优点, 提出一种基于最大似然差(maximum likelihood difference, MLD)的智能 CFAR 检测器 MLD-CFAR。MLD-CFAR 通过计算 MLD 和均值比判断前、后沿滑窗的杂波环境, 进而选择相应参考单元和均值类 CFAR 算法计算检测门限。仿真结果表明, 同 HCE-CFAR、VI-CFAR 和自动删除单元平均 CFAR(ACCA-CFAR)检测器等相比, MLD-CFAR 在杂波边缘环境中能够保持恒虚警率, 提高目标检测概率, 减少目标遮蔽现象, 在均匀环境中检测损失很小。论文还在一部线性调频连续波雷达上用实测数据验证了算法的正确性和有效性。

关键词: 雷达; 信号处理; 恒虚警检测; 杂波边缘

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.12

Intelligent CFAR detector based on maximum likelihood difference

ZHANG Ren-li, SHENG Wei-xing, MA Xiao-feng

(School of Electronic and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An intelligent constant false alarm rate (CFAR) detector with better robustness performance is proposed. This CFAR detector is based on maximum likelihood difference (MLD) and is named a MLD-CFAR detector. In this detector, the heterogeneous clutter estimation CFAR (HCE-CFAR) with a high detection probability and the variability index CFAR (VI-CFAR) with a low false alarm rate are combined. The MLD and mean ratio are computed to distinguish the clutter environments of the leading and lagging windows, and then the corresponding reference cells and the mean level CFAR algorithm are selected adaptively to calculate the detection threshold. The performance of the proposed MLD-CFAR detector is evaluated and compared with other CFAR detectors by numerical simulation. It shows that the MLD-CFAR keeps a constant false alarm rate with higher probability of detection and lower probability of target masking in clutter edge environments, and is with a lower CFAR loss in homogeneous clutter environments. Experimental results from a linear frequency modulated continuous wave radar system verify the correction and efficiency of the proposed MLD-CFAR detector.

Keywords: radar; signal processing; constant false alarm rate detector; clutter edge

0 引言

在现代雷达系统中, 恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测器将检测单元与自适应门限比较来判断目标是否存在^[1-3]。后向散射密度不同的杂波区域交界处存在杂波边缘, 在杂波边缘环境中, 强杂波单元参与门限计算使得门限抬高, 导致弱杂波区的目标难以被检测出来, 产生目标遮蔽现象; 弱杂波单元参与门限计算使得门限降低, 导致

强杂波区虚警概率升高。

为了改善在杂波边缘环境中的性能, 最早由 Hansen 提出选大单元平均 CFAR(greatest-of CFAR, GO-CFAR)检测器, 该检测器控制虚警能力较好, 但存在严重的目标遮蔽问题^[1]。针对 GO-CFAR 的不足, Finn 提出了无偏非均匀杂波估计 CFAR(heterogeneous clutter estimation CFAR, HCE-CFAR)检测器^[4], HCE-CFAR 通过似然估计和多假设检验获得杂波边缘位置, 在高杂噪比(clutter-to-noise

ratio, CNR)下 HCE-CFAR 能够正确检测杂波边缘,提高目标检测概率,但 CNR 较低且杂波边缘靠近检测单元时,HCE-CFAR 难以获得杂波边缘准确位置,导致虚警率升高;同时 HCE-CFAR 无法判断滑窗是否为均匀环境,在均匀环境中检测性能有一定的下降。文献[5]中的最大似然单元平均 CFAR (maximum likelihood cell averaging CFAR, MLC-CFAR)检测器的计算过程与 HCE-CFAR 一致,其算法性能与 HCE-CFAR 相同。文献[6]中分析了削减平均 CFAR(trimmed mean CFAR, TM-CFAR)检测器在杂波边缘的性能,TM-CFAR 依赖于删除单元与杂波环境是否一致,一致性性能较好,但不一致时依然存在虚警率高和目标遮蔽问题。针对杂波边缘环境,Himonas 提出了选大/选小 CFAR(greatest-of/smallest-of CFAR, GO/SO-CFAR)和自适应删除选大 CFAR(adaptive censored GO CFAR, ACGO-CFAR)检测器,GO/SO-CFAR^[7]采用逐级假设检验方法检测杂波边缘,当 CNR 较高时能够正确发现杂波边缘,此时性能与删除正确的 TM-CFAR 一致,当 CNR 较低时 GO/SO-CFAR 难以发现杂波边缘导致虚警率上升,ACGO-CFAR^[8]是 GO/SO-CFAR 的改进,ACGO-CFAR 控制虚警能力优于 GO/SO-CFAR,但是当杂波单元较多时存在目标遮蔽问题。文献[9]中的可变性指示 CFAR(variability index CFAR, VI-CFAR)检测器利用可变性指示(variability index, VI)判断前、后沿滑窗是否存在非均匀环境,再利用均值比(mean ratio, MR)判断前、后沿滑窗是否来自相同分布,进而选择相应参考单元计算门限,在杂波边缘环境中,VI-CFAR 能够控制虚警率,但是当滑窗内杂波单元较多时,VI-CFAR 难以检测出杂波边缘导致目标检测性能较低。文献[10]通过实测数据验证了 VI-CFAR 的性能。文献[11-12]分别对 VI-CFAR 进行了改进,有序统计 VI-CFAR(order statistic VI CFAR, OSVI-CFAR)^[11]在杂波边缘中虚警性能与 VI-CFAR 相同,并且在前、后沿滑窗同时存在干扰目标时检测能力优于 VI-CFAR,但是在杂波边缘环境中存在遮蔽问题;自动删除单元平均 CFAR(automatic censored cell averaging CFAR, ACCA-CFAR)检测器^[12]使用排序数据方差(ordered data variability, ODV)判断杂波边缘,其目标检测能力优于 VI-CFAR,但虚警尖峰较高,为此文献[2]将 ACCA-CFAR 与有序统计方法结合对其改进,提出了 MOSAC-CFAR 检测器,在杂波边缘环境中 MOSAC-CFAR 虚警控制能力较 ACCA-CFAR 有一定的改善,但存在目标遮蔽问题。文献[13]又将 ACCA-CFAR 和 GO-CFAR 结合提出选大 ACCA-CFAR (greatest-of ACCA CFAR, ACCAGO-CFAR)检测器。ACCAGO-CFAR 在杂波边缘环境中的虚警控制能力优于 ACCA-CFAR 和 MOSAC-CFAR,且滑窗内杂波数目较少时目标检测能力略优于 MOSAC-CFAR,但杂波数目增多后仍存在遮蔽现象。

开关选择 CFAR (switching CFAR, S-CFAR) 检测器^[14-15]利用检测单元的幅度信息来选取参考单元计算检测

门限。S-CFAR 在均匀环境和干扰目标环境中能够具有较高的检测概率,但是在杂波边缘环境中虚警率很高。为此文献[16-17]分别对其改进,有序统计开关选择 CFAR (switched order statistic CFAR, SW-OS-CFAR)检测器^[16]通过排序后参考单元的幅度比值来判断参考单元杂波环境,SW-OS-CFAR 在干扰目标较多时检测性能有一定的提高,但仍存在杂波边缘虚警率高的问题。文献[17]将 S-CFAR 与有序统计选大 CFAR 检测器结合,提出了有序统计选大开关选择 CFAR (switching order statistic GO CFAR, SOSGO-CFAR)检测器, SOSGO-CFAR 在杂波边缘虚警控制能力优于 S-CFAR,但是当杂波单元增多时存在遮蔽问题。

文献[18]提出了结合极值理论^[19]、广义帕累托分布和 Kolmogorov-Smirnov 检验的 CFAR 门限算法。该算法使用大量的参考单元来估计检测门限,在多目标环境中能够保持恒定虚警率。但是该算法未考虑杂波边缘情况,且当参考单元增多时,参考单元来自相同均匀分布的假设将不满足。

针对杂波边缘环境下的目标检测问题,本文结合杂波边缘环境中 HCE-CFAR 检测性能良好和 VI-CFAR 虚警控制能力强的优点,提出基于最大似然差(maximum likelihood difference, MLD)的 CFAR 检测器 MLD-CFAR,该检测器通过计算 MLD 和 MR 判断前、后沿滑窗的杂波环境,针对不同的杂波环境自适应选择相应均值类 CFAR 算法计算门限。MLD-CFAR 在杂波边缘环境中能够保持恒定虚警率,同时提高检测概率,克服了 HCE-CFAR 虚警率高和 VI-CFAR 检测概率低的缺点;在均匀环境中与 CA-CFAR 相比检测损失很小。通过仿真比较了 MLD-CFAR 和 HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 以及 ACCAGO-CFAR 的性能,最后使用雷达实测数据验证了算法的正确性和有效性。

1 MLD-CFAR 检测器

1.1 MLD-CFAR 模型

MLD-CFAR 检测器结构框图如图 1 所示,经过匹配滤波器输出的距离单元同相分量 I 和正交分量 Q 经过平方律检波器后进入长度为 $N+3$ 的滑窗,滑窗中间为检测单元,检测单元左右各有一个保护单元。其余 N 个参考单元组成参考滑窗,并且分为前沿滑窗 A 和后沿滑窗 B。

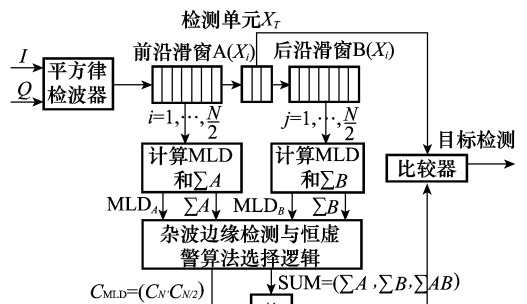


图 1 MLD-CFAR 结构框图

假设匹配滤波器输出噪声为高斯白噪声,杂波包络服从瑞利分布,目标服从 Swerling 1 型起伏。当参考滑窗位

于均匀环境时,即各参考单元仅包含噪声或者位于相同的杂波环境,参考单元的 I, Q 分量为独立同分布、零均值高斯随机变量,参考单元幅度 X_i 相互独立,并服从相同的指数分布,其概率密度函数为

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma_i^2}\right), x_i \geq 0 \quad (1)$$

式中, σ_i^2 为 X_i 的均值。当 X_i 来自噪声环境时, $\sigma_i^2 = \sigma_N^2$, 来自杂波环境时, $\sigma_i^2 = \sigma_N^2 + \sigma_c^2$, 当含有干扰目标时, $\sigma_i^2 = \sigma_N^2 + \sigma_t^2$, 其中 $\sigma_N^2, \sigma_c^2, \sigma_t^2$ 分别是输入平方律检波器的噪声、杂波、干扰目标平均功率,定义 CNR 为 $CNR = \sigma_c^2 / \sigma_N^2$, 干噪比(interference-to-noise ratio, INR) 为 $INR = \sigma_t^2 / \sigma_N^2$ 。检测单元幅度 X_T 的概率密度函数与参考单元相同,将式(1)中 σ_i^2 用 σ_T^2 代替可得 X_T 的概率密度函数为

$$f(x_T) = \frac{1}{\sigma_T^2} \exp\left(-\frac{x_T}{\sigma_T^2}\right), x_T \geq 0 \quad (2)$$

式中, σ_T^2 为 X_T 的均值。当检测单元仅含噪声时, $\sigma_T^2 = \sigma_N^2$, 来自杂波环境时, $\sigma_T^2 = \sigma_N^2 + \sigma_c^2$, 当包含目标回波时, $\sigma_T^2 = \sigma_N^2 + \sigma_s^2$, 其中 σ_s^2 是输入平方律检波器的目标平均功率,定义信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)为 $SNR = \sigma_s^2 / \sigma_N^2$ 。

当参考滑窗存在杂波边缘时,即滑窗中参考单元平均功率出现跳变,此时滑窗存在非均匀杂波环境,虽然参考单元仍然服从指数分布,但不再服从同分布条件,各参考单元的均值由其位于的噪声或杂波环境决定。本文假定参考滑窗中最多只存在一个杂波边缘,杂波边缘两侧分别为杂波区域和噪声区域,则杂波边缘环境中位于噪声区域的参考单元服从均值为 σ_N^2 的指数分布,而位于杂波区域的参考单元服从均值为 σ_c^2 的指数分布。

MLD-CFAR 首先计算 MLD,判断前、后沿滑窗是否存在杂波边缘,再计算 MR 判断前、后沿滑窗是否来自相同分布的杂波,进而根据判断结果选择前沿滑窗、后沿滑窗或者前后沿滑窗的参考单元采用均值类 CFAR 算法计算检测门限。图 1 中 C_N 和 $C_{N/2}$ 为门限因子。

1.2 MLD 与 MR 定义

在前、后沿滑窗($x_1, x_2, \dots, x_{N/2}$)中,令 H_J 表示假设杂波边缘位于第 J 个参考单元, $J \in [0, N/2 - 1]$, 其中 $J=0$ 表示滑窗不存在杂波边缘。取 $\sigma_{1(J)}^2, \sigma_{2(J)}^2$ 为 H_J 条件下杂波边缘两侧区域的平均功率,其最大似然估计分别为

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_{1(J)}^2 = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J x_i, J \in [1, N/2 - 1] \\ \hat{\sigma}_{2(J)}^2 = \frac{1}{N/2 - J} \sum_{i=J+1}^{N/2} x_i, J \in [0, N/2 - 1] \end{cases} \quad (3)$$

根据文献[4],杂波边缘位于第 J 个参考单元的似然值 L_J 为

$$L_J = \begin{cases} \prod_{i=1}^{N/2} \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma_{2(J)}^2}\right) \frac{1}{\sigma_{2(J)}^2}, J = 0 \\ \prod_{i=1}^J \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma_{1(J)}^2}\right) \frac{1}{\sigma_{1(J)}^2} \times \\ \prod_{i=J+1}^{N/2} \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma_{2(J)}^2}\right) \frac{1}{\sigma_{2(J)}^2}, J \in [1, \frac{N}{2} - 1] \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)获得似然值 L_J ,对 L_J 取自然对数

并约去常数项 $N/2$ 可得 L'_J 为

$$L'_J = \ln L_J + N/2 = \begin{cases} -N/2 \cdot \ln \hat{\sigma}_{2(J)}^2, J = 0 \\ -[J \ln \hat{\sigma}_{1(J)}^2 + (N/2 - J) \ln \hat{\sigma}_{2(J)}^2], J \in [1, N/2 - 1] \end{cases} \quad (5)$$

取 J_{\max} 和 J_{\min} 分别为 L_J 获得最大和最小值时的杂波边缘位置,定义最大似然比(maximum likelihood ratio, MLR) 为最大与最小似然值比值的 $N/2$ 开方

$$MLR = (L'_{J_{\max}} / L'_{J_{\min}})^{\frac{1}{N/2}} \quad (6)$$

为了简化 MLR 的计算,对 MLR 取自然对数,得到 MLD,化简得

$$MLD = \ln MLR = (L'_{J_{\max}} - L'_{J_{\min}}) / (N/2) \quad (7)$$

MLD 是 MLR 的简化计算式,当参考单元来自均匀环境时,MLD 的概率密度函数与参考单元功率无关,且取值较小;当参考单元存在杂波边缘时,MLD 值将增大。因此将 MLD 与固定门限 K_{MLD} 比较,通过下面的假设检验判断前、后沿滑窗是否存在杂波边缘:

$MLD \leq K_{MLD} \Rightarrow$ 均匀环境

$MLD > K_{MLD} \Rightarrow$ 杂波边缘环境 (8)

若前、后沿滑窗中仅有一个滑窗来自均匀环境,另一滑窗存在杂波边缘,那么检测单元来自均匀滑窗的杂波环境;若前、后沿滑窗都来自均匀环境,则存在下面两种可能情况:

(1) 前、后沿滑窗来自相同的杂波分布,不存在杂波边缘;

(2) 前、后沿滑窗来自不同的杂波分布,杂波边缘位于检测单元。

为了识别这两种不同情况,引入统计量 MR。取 \bar{X}_A 和 \bar{X}_B 分别为前、后沿滑窗的均值, $\sum A$ 和 $\sum B$ 分别为前、后沿滑窗参考单元的总和, $X_{I,i}$ 和 $X_{Q,i}$ 为 X_i 的 I, Q 分量。MR 定义为^[9]

$$\begin{aligned} MR &= \bar{X}_A / \bar{X}_B = \sum A / \sum B \\ \sum A &= \sum_{i=1}^{N/2} X_{i,A} = \sum_{i=1}^{N/2} (X_{I,i,A}^2 + X_{Q,i,A}^2) \\ \sum B &= \sum_{i=1}^{N/2} X_{i,B} = \sum_{i=1}^{N/2} (X_{I,i,B}^2 + X_{Q,i,B}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

当前、后沿滑窗来自相同的噪声或杂波环境时, $X_{I,i}$ 和 $X_{Q,i}$ 分别服从均值为 0, 方差为 σ_c^2 的高斯分布,则 $\sum A$ 和 $\sum B$ 分别服从自由度为 N 的 χ^2 分布:

$$\sum A, \sum B \sim \chi^2(N) \quad (10)$$

MR 服从 F 分布^[20]:

$$MR \sim F(N, N) \quad (11)$$

MR 的概率密度函数为

$$f(y) = \begin{cases} \frac{\Gamma(N)y^{N/2-1}}{\Gamma^2(N/2)(1+y)^N}, y > 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\Gamma(N)$ 是 γ (gamma) 函数。从式(12)可得出,当前、后沿滑窗来自相同分布时,MR 的概率密度函数与噪声或杂波功率无关。但是当前、后沿滑窗来自不同分布时,若前沿滑窗来自强杂波分布,MR 将增大,若后沿滑窗来自强杂波

分布,MR 将减小。因此将 MR 与门限值 K_{MR} 及其倒数 K_{MR}^{-1} 比较,通过下面的假设检验判断前、后沿滑窗是否来自相同分布:

$$K_{MR}^{-1} \leq MR \leq K_{MR} \Rightarrow \text{相同分布}$$

$$MR < K_{MR}^{-1} \text{ 或 } MR > K_{MR} \Rightarrow \text{不同分布} \quad (13)$$

针对 VI-CFAR 难以检测杂波边缘的不足,MLD-CFAR 通过假设检验(8)判断滑窗是否存在杂波边缘,其杂波边缘检测能力远大于 VI-CFAR,因而在杂波边缘环境中目标检测性能优于 VI-CFAR。针对 HCE-CFAR 无法判断滑窗是否为均匀环境和虚警率高的问题,MLD-CFAR 在前、后沿滑窗都不存在杂波边缘的前提下,通过假设检验(13)判断前、后滑窗是否来自相同分布,当来自相同分布时,MLD-CFAR 判断滑窗为均匀环境;当来自不同分布时,MLD-CFAR 判断杂波边缘位于检测单元并选择 GO-CFAR 计算门限,因此 MLD-CFAR 控制虚警能力优于 HCE-CFAR。

1.3 MLD-CFAR 检测门限生成

MLD-CFAR 的门限生成算法具体如表 1 所示。当前、后沿滑窗均不存在杂波边缘且来自相同分布时,为了获得最佳检测性能,选取滑窗中所有参考单元采用 CA-CFAR 算法计算检测门限;当前、后沿滑窗均不存在杂波边缘但来自不同分布时,杂波边缘位于检测单元,为了控制虚警率,选取强杂波滑窗采用 GO-CFAR 计算门限;当前、后沿滑窗之一存在杂波边缘时,选取均匀滑窗中的参考单元采用 CA-CFAR 计算门限,这三种情况下采用的 CFAR 算法与 VI-CFAR 相同。前、后沿滑窗都存在杂波边缘不符合本文的假定,但这种情况存在于雷达实际工作环境中,此时 VI-CFAR 采用选小单元平均 CFAR (smallest of CFAR, SO-CFAR) 计算门限将导致虚警率上升,为了控制虚警率,MLD-CFAR 采用 GO-CFAR 生成检测门限。

表 1 MLD-CFAR 参考单元选择与检测门限生成表

前沿滑窗存 在杂波边缘	后沿滑窗存 在杂波边缘	前、后沿滑窗 相同杂波分布	检测门限	CFAR 算法
否	否	是	$C_N \cdot \Sigma AB$	CA-CFAR
否	否	否	$C_{N/2} \cdot \max(\Sigma A, \Sigma B)$	GO-CFAR
是	否	—	$C_{N/2} \cdot \Sigma B$	CA-CFAR
否	是	—	$C_{N/2} \cdot \Sigma A$	CA-CFAR
是	是	—	$C_{N/2} \cdot \max(\Sigma A, \Sigma B)$	GO-CFAR

1.4 MLD-CFAR 参数选择

当滑窗长度 N 确定后, K_{MLD} 、 K_{MR} 、 C_N 和 $C_{N/2}$ 等参数决定了 MLD-CFAR 的性能。根据表 1,当前、后沿滑窗不存在杂波边缘且来自相同分布时,MLD-CFAR 选取 N 个参考单元采用 CA-CFAR 计算门限,因此门限因子 C_N 为^[6]

$$C_N = (P_{FA,design})^{-1/N} - 1 \quad (14)$$

式中, $P_{FA,design}$ 为设计虚警概率。当前沿或后沿滑窗存在杂波边缘时,MLD-CFAR 选取含有 $N/2$ 个参考单元的均匀

滑窗采用 CA-CFAR 计算门限,因此 $C_{N/2}$ 为

$$C_{N/2} = (P_{FA,design})^{-1/(N/2)} - 1 \quad (15)$$

下面讨论 K_{MLD} 和 K_{MR} 的选取,定义 α_0 为假设检验(8)中滑窗来自均匀环境却被判断为存在杂波边缘的错误概率

$$\alpha_0 = P[MLD > K_{MLD} | \text{均匀环境}] \quad (16)$$

式中, α_0 由 K_{MLD} 决定并且取值很小。考虑形成虚警尖峰的极端情况,假设前沿滑窗和检测单元来自强杂波环境,后沿滑窗来自噪声环境,杂波边缘位于检测单元,MLD-CFAR 选择不同滑窗计算门限的概率分别为

$$P[\text{选择滑窗 A}] = 1 - \alpha_0 + \alpha_0^2 \approx 1 - \alpha_0$$

$$P[\text{选择滑窗 B}] = \alpha_0(1 - \alpha_0) \approx \alpha_0$$

$$P[\text{选择滑窗 AB}] = 0 \quad (17)$$

当选择前沿滑窗产生检测门限时,MLD-CFAR 虚警概率为 $P_{FA,design}$;当选择后沿滑窗产生检测门限时,由于检测单元来自强杂波环境,后沿滑窗来自噪声环境,此时虚警概率为 1,因此虚警尖峰情况下 MLD-CFAR 总虚警概率为

$$P_{FA}^{MLD} = (1 - \alpha_0)P_{FA,design} + \alpha_0 \cdot 1 = (1 - \alpha_0)P_{FA,design} + \alpha_0 \quad (18)$$

P_{FA}^{MLD} 与 $P_{FA,design}$ 比值为

$$\frac{P_{FA}^{MLD}}{P_{FA,design}} = (1 - \alpha_0) + \frac{\alpha_0}{P_{FA,design}} \approx 1 + \frac{\alpha_0}{P_{FA,design}} \quad (19)$$

当 K_{MLD} 取值较大时, α_0 减小,使得虚警尖峰下的虚警概率 P_{FA}^{MLD} 接近于 $P_{FA,design}$,但此时假设检验(8)中的杂波边缘发现概率降低,导致目标检测能力下降;当 K_{MLD} 取值较小时,杂波边缘发现概率增大,但 α_0 也将增大,使得 P_{FA}^{MLD} 升高。因此为了在控制虚警率前提下增大杂波边缘发现概率,选择合适的 K_{MLD} 使得 α_0 与 $P_{FA,design}$ 在同一数量级。同理,定义 β_0 为假设检验(13)中前、后沿滑窗来自相同分布却被判断为不同分布的错误概率

$$\beta_0 = 1 - P[K_{MR}^{-1} \leq MR \leq K_{MR} | \text{相同分布}] \quad (20)$$

β_0 值由 K_{MR} 和式(12)决定

$$\beta_0 = 1 - \int_{K_{MR}^{-1}}^{K_{MR}} f(y) dy \quad (21)$$

β_0 取值一般不超过 0.1,在均匀环境中 β_0 对虚警概率的影响很小^[9]。由于难以获得 MLD 概率密度分布的闭型表达式,在 $P_{FA,design}$ 给定时,通过 Monte-Carlo 仿真来选取 K_{MLD} ,当 β_0 给定时,通过式(21)来计算 K_{MR} 。 K_{MLD} 和 K_{MR} 的选取方法在第 2 部分介绍。

2 MLD-CFAR 性能仿真

下面通过 Monte-Carlo 仿真分析了 MLD-CFAR 在均匀环境和杂波边缘环境中的虚警和检测性能。并将其与 HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 以及 ACCAGO-CFAR 的性能进行了比较。仿真中取参考单元 $N=32$,前后沿滑窗参考单元数为 $N/2=16$,设计虚警概率 $P_{FA,design}=1 \times 10^{-4}$,目标为 Swerling I 型起伏,仿真次数为 1×10^8 。

首先通过仿真选取 K_{MLD} ,图 2 给出了前、后沿滑窗为均匀环境时 α_0 随 K_{MLD} 的变化曲线,从图中可以看出, α_0 随着 K_{MLD} 增大而减小。通过第 1.4 节分析可知,为了保证 MLD-CFAR 的虚警性能和检测能力, α_0 必须与 $P_{FA,design}$ 保持同一数量级,因此在下面的仿真中选取 $K_{MLD}=0.64$ 使得

$\alpha_0 = 1.10 \times 10^{-4}$ 。图 3 为通过式(21)计算的 β_0 随 K_{MR} 的变化曲线,由于 β_0 取值一般不超过 0.1,仿真中选取 $K_{MR} = 1.806$ 使得 $\beta_0 = 0.1$ 。

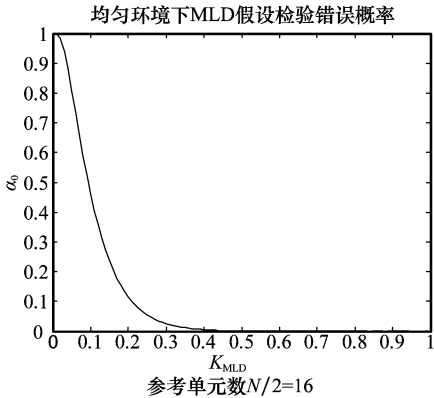


图 2 均匀环境下 α_0 随 K_{MLD} 变化曲线

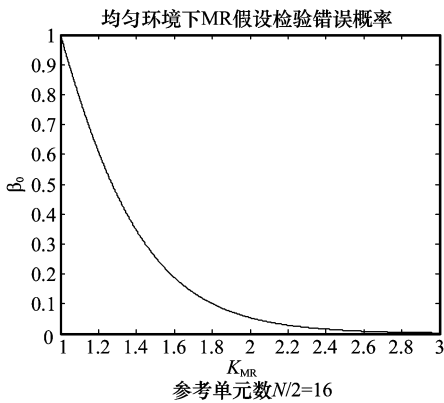


图 3 均匀环境下 β_0 随 K_{MR} 变化曲线

图 4 比较了均匀环境中 MLD-CFAR, HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 以及 ACCAGO-CFAR 的检测性能。在均匀环境中,这几种检测器性能相近,MLD-CFAR 的检测性能与 VI-CFAR 一致,略低于 CA-CFAR 和 ACCAGO-CFAR,优于其他检测器。MLD-CFAR 与 CA-CFAR 相比检测损失很小,在 $P_d = 0.5$ 时检测损失约为 0.3 dB。

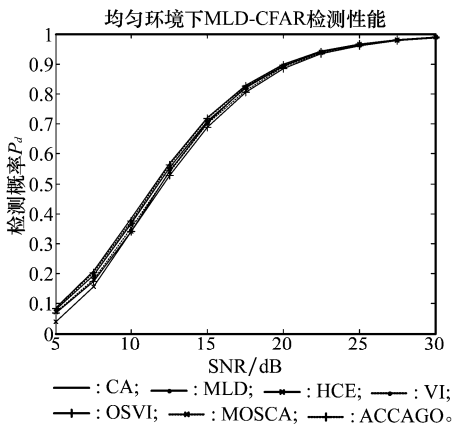


图 4 均匀环境中 MLD-CFAR 检测性能

图 5 给出了不同 CNR 条件下杂波进入前沿滑窗时 MLD-CFAR 与 VI-CFAR 的杂波边缘发现概率 P_{DC} 曲线。对于 MLD-CFAR, P_{DC} 值随着 CNR 升高而增大,当杂波边

缘检测单元较远时,容易区分出杂波与噪声单元来自不同的分布, P_{DC} 较高;当杂波边缘靠近检测单元时,滑窗内杂波单元数目增多,噪声单元被判断为来自杂波分布的概率增大,前沿滑窗被判断为均匀环境的概率增加, P_{DC} 下降;当杂波边缘位于 0 和 16 时,前沿滑窗为均匀环境,此时 P_{DC} 接近 α_0 。MLD-CFAR 的 P_{DC} 仅在杂波进入滑窗第 1 个单元时略低于 VI-CFAR,在较多杂波单元进入滑窗后,MLD-CFAR 杂波边缘发现概率远大于 VI-CFAR。

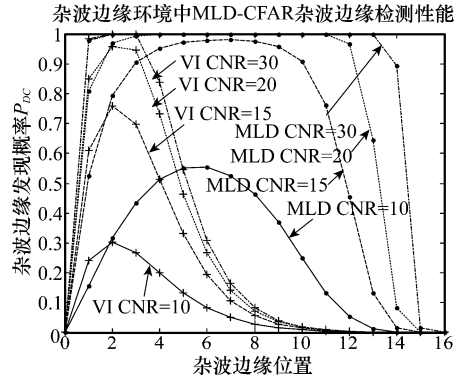


图 5 杂波边缘环境中 MLD-CFAR 杂波边缘发现概率

图 6 比较了 CNR = 20 dB 时杂波边缘环境中 MLD-CFAR, HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 以及 ACCAGO-CFAR 的虚警性能。当杂波进入前沿滑窗并且距离检测单元较远时,MLD-CFAR 检测出前沿滑窗存在杂波边缘并选择后沿滑窗计算门限,此时虚警概率接近于 $P_{FA, design}$;当杂波边缘靠近检测单元时,前沿滑窗被判断为均匀环境的概率增加,MLD-CFAR 选择 GO-CFAR 计算门限,虚警概率降低;当杂波边缘位于检测单元时,虚警尖峰与 $P_{FA, design}$ 保持在同一个数量级;当杂波边缘进入后沿滑窗后,MLD-CFAR 检测出后沿滑窗存在杂波边缘,选取前沿滑窗产生检测门限,此时虚警概率仍然接近 $P_{FA, design}$ 。从图中可看出,MLD-CFAR, VI-CFAR, ACCAGO-CFAR 以及 OSVI-CFAR 都具有较好的控制虚警能力,虚警尖峰和 $P_{FA, design}$ 保持在同一个数量级。与 VI-CFAR, ACCAGO-CFAR 和 OSVI-CFAR 相比,当杂波边缘位于前沿滑窗时,MLD-CFAR 虚警概率下降较为缓慢,当杂波进入后沿滑窗后 MLD-CFAR 虚警概率更接近 $P_{FA, design}$,因此 MLD-CFAR 控制虚警能力优于这三种检测器。MOSAC-CFAR 和 HCE-CFAR 虚警尖峰较高,是不能使用的。

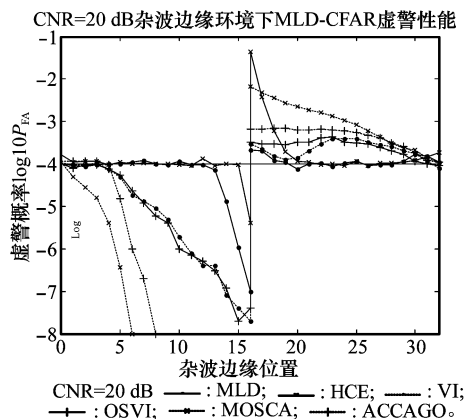


图 6 杂波边缘环境中 MLD-CFAR 虚警性能

图 7 比较了 CNR=20 dB 时 MLD-CFAR, HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 以及 ACCAGO-CFAR 在杂波边缘环境中的检测性能,其中 SNR=CNR,杂波从前沿滑窗进入参考单元。当杂波边缘离检测单元较远时,MLD-CFAR 选择后沿滑窗计算门限,目标检测概率较高;当杂波边缘靠近检测单元时,为了控制虚警率,MLD-CFAR 选择 GO-CFAR 的概率增加,目标检测概率降低。从图中可看出,HCE-CFAR 的检测性能较好,但由于其控制虚警能力较差而不采用。当杂波单元少于 ACCAGO-CFAR 假设的最大数目时,MLD-CFAR 检测概率略低于 ACCAGO-CFAR,优于 VI-CFAR, OSVI-CFAR 和 MOSAC-CFAR,当杂波数目增多后 MLD-CFAR 检测概率明显优于 VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 和 ACCAGO-CFAR。MLD-CFAR 在较多杂波单元进入滑窗过程中保持较高的检测概率,有效降低了目标遮蔽现象。

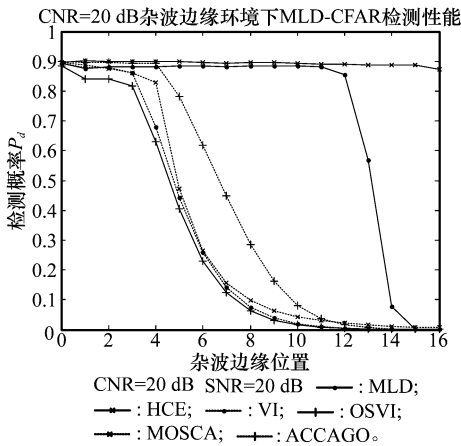


图 7 杂波边缘环境下 MLD-CFAR 检测性能

3 MLD-CFAR 实验验证

本节使用雷达实测数据验证 MLD-CFAR 在实际工作环境中的性能。该雷达采用线性调频连续波 (linear frequency modulated continuous wave, LFM CW) 体制,工作在 X 波段,发射信号采用对称三角调制,调制周期 $T_r=1\ 860\ \mu\text{s}$,发射信号带宽 $B_T=18.6\ \text{MHz}$,调频斜率 $\mu=20\ \text{kHz}/\mu\text{s}$,信号处理有效带宽 $B_E=16.384\ \text{MHz}$ 。为了抑制固定杂波,提高处理增益,信号处理采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) + 动目标检测 (moving target detection, MTD) 方式,MTD 采用 32 点 FFT 实现。

在硬件上实现 LFM CW 雷达时采用 FPGA+DSP 构架的雷达信号处理器,本文提出的 MLD-CFAR 逻辑判断分支较多,难以在 FPGA 上实现,因而信号处理平台选用 XC4V SX35 FPGA 完成数据汇拢和 FFT 处理,MTD 和 MLD-CFAR 检测在的 TS 201 DSP 上完成。

图 8 为实测数据经过信号处理和平方律检波后输出的距离和多普勒单元幅度。建筑物和风吹动树林的杂波谱展宽到低速多普勒通道形成强杂波区,运动速度较大的目标 1 和目标 2 位于均匀杂波环境,速度较小的目标 3 位于杂波边缘,其副瓣位于均匀杂波环境。杂波功率远大于目标功率。分别采用

MLD-CFAR, HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, MOSAC-CFAR 以及 ACCAGO-CFAR 处理图 8 中的距离和多普勒单元。

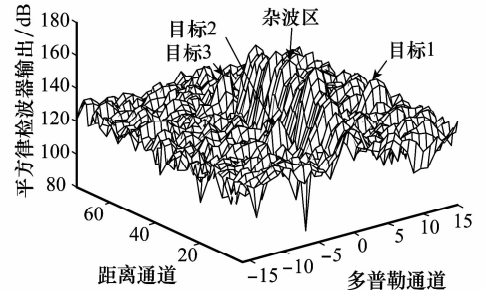


图 8 MTD 后平方律检波器输出距离和多普勒单元

图 9 为经过 MLD-CFAR 处理输出的目标点迹。从图中可看出,MLD-CFAR 能够准确检测出目标 1、2 和 3 位于的距离和多普勒通道,同时无虚警。HCE-CFAR 能够检测出目标 1、2 和 3,但存在虚警;VI-CFAR, OSVI-CFAR, ACCAGO-CFAR 和 MOSAC-CFAR 能够准确检测出目标 1 和 2 的位置,但只能检测出目标 3 位于均匀环境的副瓣,无法检测出其位于杂波边缘中的主瓣位置,且 MOSAC-CFAR 存在虚警。因此 MLD-CFAR 在实际环境中保持了良好的性能,优于其他 5 种检测器。

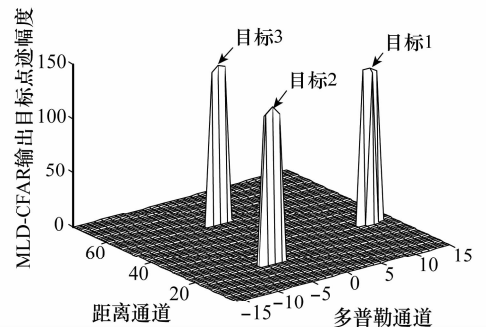


图 9 MLD-CFAR 检测目标点迹

4 结论

本文结合 HCE-CFAR 和 VI-CFAR 在杂波边缘环境中的优点,提出了基于最大似然差的恒虚警检测器 MLD-CFAR,该检测器通过计算最大似然差和均值比判断滑窗的杂波环境,自适应选择参考单元和均值类恒虚警算法产生检测门限。在杂波边缘环境中,MLD-CFAR 控制虚警能力优于 HCE-CFAR, VI-CFAR, OSVI-CFAR, ACCAGO-CFAR 和 MOSAC-CFAR,在虚警尖峰情况下虚警概率与设计值保持在同一数量级;当杂波单元较少时,MLD-CFAR 的检测性能与 ACCAGO-CFAR 相差很小,优于 VI-CFAR, OSVI-CFAR 和 MOSAC-CFAR,当杂波单元增多后,检测性能明显优于 VI-CFAR, OSVI-CFAR, ACCAGO-CFAR 和 MOSAC-CFAR,有效降低了目标遮蔽现象。在均匀环境中,MLD-CFAR 与 CA-CFAR 相比检测损失很

小。通过仿真和雷达实测数据验证了 MLD-CFAR 具有良好的性能。

参考文献:

- [1] De M A, Farina A, Foglia G. Design and experimental validation of knowledge-based constant false alarm rate detectors[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2007, 1(4): 308 - 316.
- [2] 郝程鹏, 原建平, 司昌龙, 等. 基于有序统计和自动删除平均的恒虚警检测器[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 10 - 13. (Hao C P, Yuan J P, Si C L, et al. CFAR detector based on ordered statistics and automatic censoring cell averaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(1): 10 - 13.)
- [3] Cao T V. Design of low-loss CFAR detectors[C]// *Proc. of International Conference on Radar*, 2008: 712 - 717.
- [4] Finn H M. A CFAR design for a window spanning two clutter fields[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(2): 155 - 169.
- [5] Pourmottaghi A, Taban M R, Norouzi Y, et al. A robust CFAR detection with ML estimation [C] // *Proc. of IEEE Radar Conference*, 2008.
- [6] Gandhi P P, Kassam S A. Analysis of CFAR processors in non-homogeneous background[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4): 427 - 444.
- [7] Himonas S D, Barkat M. Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 286 - 304.
- [8] Himonas S D. Adaptive censored greatest-of CFAR detection[J]. *IEE Proceeding-F*, 1992, 139(3): 247-255.
- [9] Smith M E, Varshney P K. Intelligent CFAR processor based on data variability[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 837 - 847.
- [10] Zhang R L, Zou Y W, Sheng W X, et al. An improved CFAR detector for non-homogeneous clutter environment[C] // *Proc. of the International Symposium on Signals, Systems and Electronics*, 2010: 594 - 597.
- [11] 胡文琳, 王永良, 王首勇. 一种基于有序统计量的鲁棒 CFAR 检测器[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 530 - 533. (Hu W L, Wang Y L, Wang S Y. A robust CFAR detector based ordered statistic[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 530 - 533.)
- [12] Farrouki A, Barkat M. Automatic censoring CFAR detector based on ordered data variability for nonhomogeneous environments[J]. *IEE Proceeding-Radar Sonar Navigation*, 2005, 152(1): 43 - 51.
- [13] 曲超, 郝程鹏, 杨树元. 基于自动删除算法的最大选择恒虚警检测器[J]. 现代雷达, 2008, 30(6): 68 - 72. (Qu C, Hao C P, Yang S Y. A new greatest selection CFAR detector based on automatic censoring algorithm [J]. *Modern Radar*, 2008, 30(6): 68 - 72.)
- [14] Cao T V. Constant false-alarm rate algorithm based on test cell information[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2008, 2(3): 200 - 213.
- [15] Meng X W. Comments on constant false-alarm rate algorithm based on test cell information [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2009, 3(6): 646 - 649.
- [16] Tom A, Viswanathan R. Switched order statistics CFAR test for target detection[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2008.
- [17] Song Y Z, Meng X W, Qu F Y. A new CFAR method based on test cell statistics[C]// *Proc. of the IET International Radar Conference*, 2009.
- [18] Broadwater J, Chellappa R. Adaptive threshold estimation via extreme value theory[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 58(2): 490 - 500.
- [19] Roberts S J. Novelty detection using extreme value statistics[J]. *IEE Proceeding Vision Image Signal Process*, 1999, 146(3): 124 - 129.
- [20] Spiegel M R. *Schaum's outline of theory and problems of probability and statistics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.