

# 距离扩展目标检测器的最优参数及鲁棒性分析

简 涛,何 友,苏 峰,曲长文,平殿发

(海军航空工程学院信息融合技术研究所,山东烟台 264001)

**摘 要:** 研究了球不变随机向量杂波下的距离扩展目标自适应检测问题,推导了级联二进制积累检测器(CBI)的最优参数;利用辅助数据,基于迭代估计方法获得协方差矩阵结构的近似最大似然估计,设计了具有近似恒虚警率特性的自适应检测器.仿真实验表明,最优 CBI 在估计目标散射点个数失配情况下具有很好的鲁棒性;随着散射点个数的增加,其在失配情况下的鲁棒性越来越好,且均优于匹配情况下基于目标散射点密度的检测器和不依赖于散射点密度的检测器.

**关键词:** 非高斯杂波;距离扩展目标;自适应检测;最优参数;鲁棒性分析

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2190-04

## Optimized Parameters and Robustness Evaluation for Range-Spread Target Detector

JIAN Tao, HE You, SU Feng, QU Chang-wen, PING Dian-fa

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

**Abstract:** Under the spherically invariant random vector clutter, the adaptive detection of range-spread target is addressed. The parameters of cascaded binary integrator (CBI) are optimized. Moreover, based on secondary data, an adaptive CBI is derived, which is approximately of constant false alarm rate. The experimental results show that, the optimized CBI performs robustly for the mismatch between the estimated number of target scatterers and the actual one. In addition, the robustness is enhanced as the number of target scatterers increases. The optimized CBI in mismatch cases outperforms the scatterer-density-dependent detector in match cases and the non-scatterer-density-dependent detector.

**Key words:** non-Gaussian clutter; range-spread target; adaptive detection; optimized parameters; robustness evaluation

## 1 引言

高距离分辨率雷达目标回波表现为距离扩展目标的形式<sup>[1]</sup>.在高分辨率情况下,雷达会接收到类似于目标的尖峰杂波<sup>[2,3]</sup>,这种非高斯杂波可用球不变随机向量(SIRV)来建模<sup>[4]</sup>.在 SIRV 杂波下,文献[5]提出了不依赖于散射点密度的检测器(NSDD)和利用散射点密度先验信息的检测器(SDD).由于 SDD 是统计平均意义下的最优检测,存在一定的检测损失.文献[6]利用目标散射点分布的先验信息,提出了级联二进制积累检测策略(CBI),分析了匹配情况下的检测性能,但未能使 CBI 的检测性能达到最优.另外,以上几种检测器都是在已知杂波协方差矩阵结构的情况下获得的,非完全意义的自适应检测器.

本文进一步推导了 CBI 检测器最优参数的确定方法,并在失配条件下进行了鲁棒性分析.在未知杂波协方差矩阵结构的情况下,基于辅助数据,设计了对杂波

协方差矩阵结构和功率水平均具有近似恒虚警率(CAFR)特性的自适应检测器(ACBI),并进行了有效性验证.

## 2 问题描述

需跨过  $K$  个距离单元  $z_t, t = 1, \dots, K$  检测一个距离扩展目标存在与否.为了进行自适应检测,假设不包含目标信号的辅助数据集  $z_t, t = K + 1, \dots, K + R$  是可用的,并具有与待检测单元同分布的非高斯杂波<sup>[7]</sup>.设定  $R > N$ ,这样能确保由辅助数据获得的协方差矩阵是非奇异的<sup>[7]</sup>.考虑杂波为主的干扰环境,所要解决的检测问题可表示为:

$$\begin{aligned} H_0: z_t &= c_t, & t &= 1, \dots, K + R \\ H_1: \begin{cases} z_t = \alpha_t p + c_t, & t = 1, \dots, K \\ z_t = c_t, & t = K + 1, \dots, K + R \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $p = (1, e^{j\phi}, \dots, e^{j(N-1)\phi})^T / \sqrt{N}$  是已知的单位导向矢量,  $\phi$  为常数,  $N$  为阵元数,符号  $(\cdot)^T$  表示转置;  $\alpha_t$  是

目标散射点未知复幅度。

杂波向量  $\mathbf{c}_t$  用 SIRV 分布来建模<sup>[4]</sup>, 即

$$\mathbf{c}_t = \sqrt{\tau_t} \cdot \boldsymbol{\eta}_t, t = 1, \dots, K + R \quad (2)$$

式中,  $\boldsymbol{\eta}_t$  为  $N$  维复高斯随机向量, 其协方差矩阵为  $\boldsymbol{\Sigma}$ ; 纹理分量  $\tau_t$  是非负随机变量, 服从未知分布  $f_\tau$ .  $\boldsymbol{\eta}_t$  与  $\tau_t$  相互独立, 且各自在不同距离单元之间是独立的。

为了简化模型, 假设一个距离单元最多只有一个散射点. 在未知杂波协方差矩阵结构的情况下, 本文采用基于广义似然比检验 (GLRT) 的两步法检测策略<sup>[7]</sup>来实现自适应检测。

### 3 级联检测的最优参数和自适应实现

本节介绍了 CBI 检测器, 确定了最优检测参数, 并给出了检测器的自适应实现途径。

#### 3.1 级联二进制积累检测策略

如果直接将传统的多脉冲二进制积累器 ( $M/H$  检测器) 应用于距离扩展目标检测, 在目标散射点密集时, 会存在较大的检测损失<sup>[5]</sup>. 为了充分利用目标散射点的位置信息, 在已知  $\boldsymbol{\Sigma}$  的情况下, 文献[6]提出了 CBI 检测器 (如图 1 所示)。

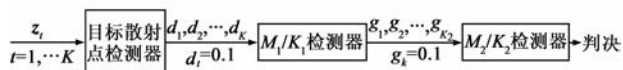


图1 距离扩展目标级联检测器CBI的示意图

CBI 检测器首先对单个距离单元的散射点进行检验, 第一级的目标散射点检测器 (TSD) 的检验统计量可表示为<sup>[6]</sup>

$$\lambda_1(\mathbf{z}_t) = -2(N-1) \ln \left[ 1 - \frac{|\mathbf{p}^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{z}_t|^2}{(\mathbf{z}_t^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{z}_t)(\mathbf{p}^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{p})} \right] \quad (3)$$

其中, 符号“ $(\cdot)^H$ ”表示共轭转置。

观测向量  $\mathbf{z}_t$  经过 TSD 检测, 输出结果用  $d_t$  表示; 其中超过第一门限  $T_1$  的检测结果设定为  $d_t = 1$ ; 否则设定为  $d_t = 0$ . 接着, 将  $d_t$  作为第二级检测器 (滑窗式

$M_1/K_1$  检测器) 的输入, 如果连续  $K_1$  个  $d_t$  的和  $\sum_{t=k}^{k+K_1-1} d_t$  超过第二门限  $T_2 = M_1$ , 则检测结果设定为  $g_k = 1$ , 否则设定为  $g_k = 0$ , 其中  $K_2 = K + 1 - K_1$ . 最后, 将第二级检测器的输出结果  $g_k$  作为第三级  $M_2/K_2$  检测器的输入,

如果  $\sum_{k=1}^{K_2} g_k$  超过第三门限  $T_3 = M_2$ , 则式(1)中的  $H_1$  假设成立, 即判定存在距离扩展目标, 否则判定目标不存在。

#### 3.2 最优参数的确定

在给定总虚警概率的条件下, 如何确定最佳参数  $M_1$ 、 $K_1$  及  $M_2$  (分别用  $M_{1\text{opt}}$ 、 $K_{1\text{opt}}$  及  $M_{2\text{opt}}$  表示) 是实现最

优级联检测的关键。

首先, 研究  $M_{1\text{opt}}$  的确定方法. 本文主要考虑不同距离单元目标散射点相互独立且瑞利起伏的情况, 如果将不同单元目标散射点看作是一个个点目标, 则这里的目标散射点模型与 Swerling II 型点目标具有相似之处<sup>[2]</sup>. 文献[8]表明, 只要  $M$  的取值接近于  $M_{\text{opt}}$ , 则检测概率对  $M$  的选取是不敏感的. 当  $9 \leq H \leq 700$ 、 $10^{-4} \leq P_{\text{fa}} \leq 10^{-8}$  且  $0.2 \leq P_d \leq 0.9$  时, 利用  $M/H$  检测器检测 Swerling II 型点目标时的  $M_{\text{opt}}$  可由下式确定<sup>[8]</sup>

$$M_{\text{opt}} \approx 10^c H^a \quad (4)$$

其中, 系数  $a$  和  $c$  分别为

$$a = 0.91, c = -0.38 \quad (5)$$

由式(4)可知, 随着  $H$  的增大,  $M_{\text{opt}}$  是单调递增的, 这为下面确定  $2 \leq h_0 \leq 8$  时的  $M_{1\text{opt}}$  提供依据。

由于式(4)的  $M_{\text{opt}}$  值是针对点目标多脉冲检测获得的, 当点目标存在时,  $H$  个脉冲回波都包含目标信息, 因此  $H$  可以等效为总的目标散射点个数  $h_0$ . 而距离扩展目标的散射点常常在  $K$  个距离单元内稀疏分布, 即  $h_0 < K$ . 为了保证第二级  $M_1/K_1$  检测器的最大检测概率, 可以利用下式来确定最优  $M_1$  的取值

$$M_{1\text{opt}} \approx 10^c h_0^a, 9 \leq h_0 \leq 700 \quad (6)$$

而对于  $2 \leq h_0 \leq 8$  的情况, 可采用穷举法确定  $M_{1\text{opt}}$ , 这将在后续的性能分析中给出。

其次, 研究  $K_{1\text{opt}}$  的确定方法. 注意到  $1 \leq K_1 \leq K$ . 一方面, 为了增强检测器的鲁棒性, 需保证滑窗内以最大的概率包含  $M_{1\text{opt}}$  个散射点, 因此必须选择较大的  $K_1$  值; 另一方面, 由于  $K_2 = K + 1 - K_1$ , 过大的  $K_1$  值会导致过小的  $K_2$  值, 进而会导致  $M_2/K_2$  检测器的灵活性下降, 最终影响 CBI 的性能. 关于目标散射点的位置分布, 这里考虑两种极端情况. Model.1 中所有  $h_0$  个目标散射点连续占据  $h_0$  个距离单元, 此时所需的最优  $K_1$  值最小; Model.2 中  $h_0$  个目标散射点以最大间隔  $S_{\text{max}}$  均匀分布在  $K$  个距离单元中,

$$S_{\text{max}} = \text{round}((K-1)/(h_0-1)), 2 \leq h_0 \leq K \quad (7)$$

其中,  $\text{round}(\cdot)$  表示四舍五入取整。

Model.2 所需的最优  $K_1$  值最大, 考虑到估计目标散射点个数可能存在的误差影响, 首先取  $K_1'$  作为滑窗长度, 即

$$K_1' = \begin{cases} S_{\text{max}}(M_{1\text{opt}} + 1), & S_{\text{max}} \geq 2 \\ 2(M_{1\text{opt}} + 1), & S_{\text{max}} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

当  $S_{\text{max}} = 1$  时, 由于目标散射点过于密集, 为了保持检测器的鲁棒性, 对  $K_1'$  作了适当调整。

由于  $1 \leq K_1 \leq K$ , 如果  $K_1' > K$ , 则考虑取滑窗长度为  $K_1'$ , 即

$$K_1'' = S_{\max} M_{1\text{opt}} \quad (9)$$

如果  $K_1' > K$ , 则考虑取  $K_1 = K$ , 此时  $K_2 = M_2 = 1$ , CBI 等价于普通二进制积累器。

综合来看, 在给定  $M_{1\text{opt}}$  的条件下,  $K_{1\text{opt}}$  可由下式确定

$$K_{1\text{opt}} = \begin{cases} K_1', & K_1' < K \\ \min(K_1'', K), & K_1' \geq K \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\min(\cdot, \cdot)$  表示取参数中的较小值。

最后, 研究  $M_{2\text{opt}}$  的确定方法, 主要考虑  $K_{1\text{opt}} < K$  的情况。根据式(10), 最优  $K_2$  值可以表示为

$$K_{2\text{opt}} = K + 1 - K_{1\text{opt}}, 1 < K_{1\text{opt}} < K \quad (11)$$

在  $K$  个距离单元存在  $h_0$  个目标散射点的情况下,  $M_1/K_1$  检测器的输出  $g_k, k = 1, \dots, K_2$  中最多只有  $M_2' = h_0 + 1 - M_1$  个值为 1, 因此,  $M_2$  必须满足  $1 \leq M_2 \leq M_2'$ 。另外, 当  $M_2 = 1$  时, CBI 的检测性能与普通二进制积累器极为接近, 因此, 为了获得较好的检测性能, 通常  $M_2$  必须满足

$$2 \leq M_2 \leq K_2 \quad (12)$$

综合考虑估计目标散射点个数可能存在的误差影响, 为了保证 CBI 的鲁棒性,  $M_{2\text{opt}}$  可取

$$M_{2\text{opt}} = \max(2, \min(K_{2\text{opt}}, M_2' - 2)) \quad (13)$$

其中,  $\max(\cdot, \cdot)$  表示取参数中的较大值。

### 3.3 检测器的自适应实现

为获得自适应检测器 ACBI, 本文利用迭代估计器获得协方差矩阵结构的近似最大似然(AML)估计<sup>[9]</sup>, 即

$$\hat{\Sigma}(i+1) = \frac{1}{R} \sum_{t=K+1}^{K+R} \frac{N z_t z_t^H}{z_t^H [\hat{\Sigma}(i)]^{-1} z_t} \quad (14)$$

其中,  $i = 0, 1, \dots, N_{ii} - 1$ ,  $N_{ii}$  表示最终的迭代次数。并采用下式作为初始化矩阵:

$$\hat{\Sigma}(0) = \frac{1}{R} \sum_{t=K+1}^{K+R} \frac{N z_t z_t^H}{z_t^H z_t} \quad (15)$$

研究表明<sup>[9]</sup>, 迭代过程具有很快的收敛速度, 当  $N_{ii} \geq 3$  时, 利用  $\hat{\Sigma}(N_{ii})$  获得的自适应检测器对  $\Sigma$  和杂波功率水平均具有近似 CFAR 特性。因此, 用  $\hat{\Sigma}(N_{ii})$  代替式(3)中的  $\Sigma$  即可获得基于 AML 估计的 ACBI 检测器。

## 4 性能分析

本节首先确定了  $2 \leq h_0 \leq 8$  条件下 CBI 检测器的  $M_{1\text{opt}}$ , 接着对所提出的检测器进行了性能分析。

为了便于比较, 仿真中采用与文献[6]相同的杂波环境, 其中  $\gamma$  表示杂波协方差矩阵结构的一阶相关系数,  $f_c$  采用  $\Gamma$  分布建模, 并用  $L$  来控制与正态统计量偏离的程度。假设估计的目标散射点个数为  $h_e$ 。

首先, 确定  $2 \leq h_0 \leq 8$  时 CBI 的  $M_{1\text{opt}}$ 。如前所述, 随着  $h_0$  的增大,  $M_{1\text{opt}}$  是单调递增的。在  $h_0 = 9$  时, 由式(7)

可得  $M_{1\text{opt}} = 3$ , 因此, 当  $2 \leq h_0 \leq 8$  时,  $1 \leq M_{1\text{opt}} \leq 3$ 。针对 Model.1 和 Model.2, 在  $h_0 = h_e = 8$  条件下, 图 2 给出了 CBI ( $M_1 = 1, 2, 3$ ) 的检测性能曲线。从图 2 中可以看出, 当  $h_0 = 8$  时,  $M_{1\text{opt}} = 2$ 。根据  $M_{1\text{opt}}$  变化的单调性, 当  $2 \leq h_0 \leq 7$  时,  $1 \leq M_{1\text{opt}} \leq 2$ 。由于篇幅的限制, 表 1 直接给出  $2 \leq h_0 \leq K$  的  $M_{1\text{opt}}$ 。

表 1  $K = 15$  时  $2 \leq h_0 \leq K$  对应的 CBI 最优鲁棒检测参数

$h_0$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$M_{1\text{opt}}$	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	5	5
$K_{1\text{opt}}$	14	14	10	12	9	6	6	8	8	10	10	10	12	12
$M_{2\text{opt}}$	2	2	2	2	3	4	5	5	6	6	6	6	4	4

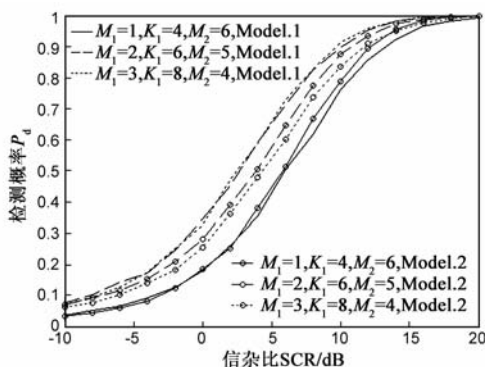


图2  $N=2, L=1, \gamma=0, K=15, h_0=h_e=8, P_{fa}=10^{-4}, M_1=1, 2, 3$  时, Model.1 和 Model.2 对应的 CBI 检测性能

图 3 和图 4 分别给出了两种不同散射点密度情况 ( $h_0 = 3, 8$ ) 下, 估计目标散射点个数失配 ( $h_0 \neq h_e$ ) 时最优 CBI 的检测性能, 并与 SDD 和 NSDD 进行了比较。从图 3 和图 4 综合来看, 无论散射点密度稀疏或密集, 最优 CBI 在失配条件下存在较小的检测损失, 且均好于匹配时的 SDD 和 NSDD, 特别是在低 SCR 条件下; 而随着散射点个数  $h_0$  的增加, 最优 CBI 的鲁棒性越来越好。

最后, 为了验证 ACBI 的有效性, 采用实测高海况杂波数据(hi.dat)<sup>[10]</sup> 进行分析。基于 AML 估计, 图 5 比较了 ACBI 与 ASDD 和 ANSDD 的检测性能。可以看出, 在实测数据条件下, ACBI 依然好于 ASDD 和 ANSDD, 这与前面的仿真分析结果是一致的。

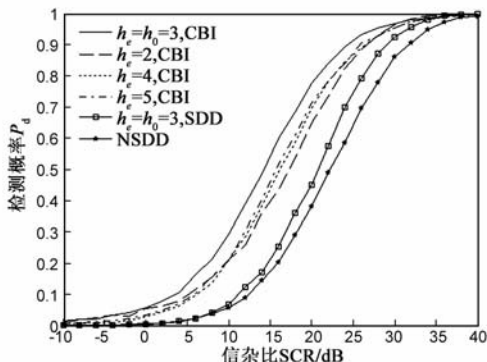


图3  $N=2, L=1, \gamma=0, K=15, h_0=3, P_{fa}=10^{-4}$ , Model.1 时, 最优 CBI ( $h_e=2, 3, 4, 5$ ) 和 SDD ( $h_e=3$ ) 及 NSDD 的检测性能

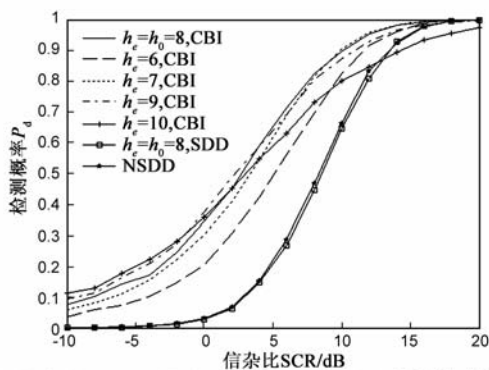


图4  $N=2, L=1, \gamma=0, K=15, h_0=8, P_{fa}=10^{-4}$ , Model.1时, 最优CBD ( $h_e=6, 7, 8, 9, 10$ )和SDD( $h_e=8$ )及NSDD的检测性能

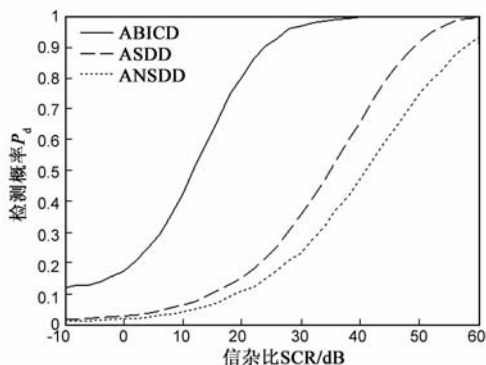


图5  $N=2, K=15, N_{fa}=3, R=4, h_0=h_e=3, P_{fa}=10^{-2}$ , Model.1时, 实测杂波中ACBI和ASDD及ANSDD的检测性能

## 5 结论

本文研究了 SIRV 非高斯杂波背景下的距离扩展目标自适应检测问题, 获得了 CBI 检测器的最优参数确定方法, 进行了检测器的鲁棒性分析; 基于 AML 估计, 获得了具有近似 CFAR 特性的自适应检测器 ACBI. 仿真实验表明, 最优 CBI 在估计目标散射点个数失配情况下具有很好的鲁棒性; 随着散射点个数的增加, 其鲁棒性越来越好, 且优于匹配情况下的 SDD 和 NSDD.

## 参考文献

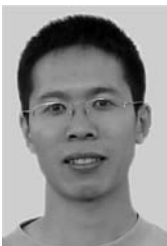
- [1] D R Wehner. High-Resolution Radar [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [2] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波下修正的 SDD-GLRT 距离扩展目标检测器[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2662 – 2667.
- Jian Tao, He You, Su Feng, et al. Modified SDD-GLRT detector for range-spread targets in non-Gaussian clutter[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2662 – 2667. (in Chinese)
- [3] 陈彦辉, 谢维信. 天然粗糙面杂波中雷达目标的检测[J].

电子学报, 2000, 28(7): 138 – 141.

Chen Yanhui, Xie Weixin. Detection of radar target in clutter from natural rough surface[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 138 – 141. (in Chinese)

- [4] K Yao. A representation theorem and its applications to spherically invariant random processes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19(5): 600 – 608.
- [5] K Gerlach. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 926 – 934.
- [6] 简涛, 何友, 苏峰, 等. SIRV 杂波下距离扩展目标 CFAR 检测器[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2740 – 2744.
- Jian Tao, He You, Su Feng, et al. Range-spread target CFAR detection under SIRV clutter[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2740 – 2744. (in Chinese)
- [7] F C Robey, D R Fuhrmann, E J Kelly, et al. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(1): 208 – 216.
- [8] D A Shnidman. Binary integration for Swerling target fluctuations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 1043 – 1053.
- [9] F Gini, M Greco. Covariance matrix estimation for CFAR detection in correlated heavy tailed clutter[J]. Signal Processing, 2002, 82(12): 1847 – 1859
- [10] Rembrandt Bakker, Brian Currie. IPIX radar clutter data[EB/OL]. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/dartmouth/datasets.html>, 2011.01.15.

## 作者简介



简涛 男, 1980 年 8 月出生于湖北天门, 现为海军航空工程学院讲师. 主要研究方向为雷达信号检测与信号处理, 现代信号处理及智能信号处理在雷达中的应用.

E-mail: iamjiantao@yahoo.com.cn



何友 男, 1956 年 10 月出生于吉林, 现为海军航空工程学院教授. 主要研究方向为雷达目标自适应检测、多传感器信息融合和模式识别等.