

Strong Scatterers Integrator Based on ADT in Non-Gaussian Clutter

Gu Xinfeng^{1,*}, Hao Xiaolin², Yang Ganlin¹, Li Xinxing¹

¹China Satellite Maritime Tracking & Control Department, Jiangyin, China

²Yantai Electricityn and Economy Technical Institute, Yantai, China

Email address:

y6ckgxf@126.com (Gu Xinfeng)

*Corresponding author

To cite this article:

Gu Xinfeng, Hao Xiaolin, Yang Ganlin, Li Xinxing. Strong Scatterers Integrator Based on ADT in Non-Gaussian Clutter. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 26-30. doi: 10.11648/j.sd.20160401.15

Received: March 4, 2016; Accepted: March 12, 2016; Published: April 16, 2016

Abstract: This paper addresses range-spread target detection in compound Gaussian clutter modeled as spherically invariant random vector clutter (SIRV). A Strong scatterers integrator based on Anderson-Darling test (ADT-SSI) is addressed for the problem that MSDD has detection loss when falsely estimating the number of scatterers. For ADT-SSI, adaptively estimate the number of target scatterers according to the observations, which can improve detection performance and robustness of detector effectively.

Keywords: Non-Gaussian Clutter, Range-Spread Rarget, Detection, Anderson- Darling Test

复合高斯背景下基于ADT的强散射点积累检测器

顾新锋^{1,*}, 郝晓琳², 杨甘霖¹, 李新星¹

¹中国卫星海上测控部, 江阴, 中国

²烟台电力经济技术研究所, 烟台, 中国

邮箱

y6ckgxf@126.com (顾新锋)

中文摘要: 本文研究了SIRV建模的复合高斯杂波背景下的距离扩展目标检测问题。针对MSDD检测器在估计目标散射点个数估计失配时存在一定检测损失的问题, 提出了一种基于AD检验的强散射点积累检测器(ADT-SSI)。首先, 利用AD检验估计目标散射点个数, 再利用估计的强散射点进行积累与门限比较。仿真结果和实测数据验证表明, 与MSDD相比ADT-SSI具有更好的检测性能和鲁棒性。

关键词: 非高斯杂波, 距离扩展目标, 检测, AD检验

1. 引言

与低分辨率雷达不同, 高分辨率雷达能够在空间上把一个目标分解成许多散射点, 目标回波在雷达径向上的多个强散射点分布在不同的距离单元中, 形成距离扩展目标

[1, 2]。目标的离散散射中心常被称为多主散射中心MDS (multiple dominant scattering)。增加雷达分辨率并采用适当的检测方法能极大地提高检测概率[3], 但如果采用传统点目标检测器, 由于部分目标能量泄漏到参考单元中, 检测性能将大大下降, 甚至完全失效[4]。文献[5-7]

研究了高斯杂波背景下距离扩展目标的检测方法,但在高分辨率情况下,雷达会接收到类似于目标的尖峰,此时高斯模型不再适用,这种含尖峰的杂波可用球不变随机向量SIRV (spherically invariant random vector)来建模[2,8]。文献[9]在SIRV杂波条件下,提出了不依赖于散射点密度的广义似然比检验检测器NSDD (non-scatterer density dependent)和基于目标散射点密度先验信息的检测器SDD (scatterer density dependent)。由于SDD是统计平均意义下的最优检测,未能充分利用散射点密度的先验信息,存在一定的检测损失。文献[10]有效利用目标散射点信息,获得了修正的检测器MSDD(modified SDD),并证明了MSDD的恒虚警率(CFAR, constant false alarm rate)特性。虽然MSDD的检测性能要优于NSDD和SDD,但估计的目标散射点个数与实际值不一致时,MSDD存在一定的检测损失。为此,文本利用AD检验(Anderson-Darling test)估计目标强散射点个数,再对强散射点进行积累检测,这样,检测器能够根据实际观测值估计散射点个数,提高了检测性能,增强了系统的鲁棒性。

2. 问题描述

假设数据从 N 个阵元得到,需解决跨过 K 个距离单元 \mathbf{z}_t , $t=1, 2, \dots, K$ 检测一个目标存在与否的问题。假设可能的目标完全包含在这 K 个距离单元中,并且忽略距离走动的问题。考虑杂波为主的干扰环境,忽略内部噪声的影响。所要解决的检测问题可表示为:

$$\begin{aligned} H_0: \mathbf{z}_t &= \mathbf{c}_t, & t=1, \dots, K \\ H_1: \mathbf{z}_t &= \alpha_t \mathbf{p} + \mathbf{c}_t, & t=1, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{p} 表示已知的单位导向矢量,即 $\mathbf{p}^H \mathbf{p}=1$ (符号“(·)^H”表示共轭转置); 标量 α_t 是反映目标和信道影响的未知确定性参数。当 $\mathbf{p} = (1, e^{j\phi}, e^{j2\phi}, \dots, e^{j(N-1)\phi})^T / \sqrt{N}$ 时(其中 ϕ 为常数,符号“(·)^T”表示转置),式(1)表示的目标模型与移动距离扩展目标模型相似[6],在那里假设目标在 N 个脉冲的相干处理时间内无距离走动。

杂波回波用SIRV分布来建模[8],则杂波向量 \mathbf{c}_t 可以表示成

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

式中, $\boldsymbol{\eta}_t = (\eta_t(1), \eta_t(2), \dots, \eta_t(K))^T$, $\eta_t(n)$, $n=1, 2, \dots, N$ 是独立同分布(IID, independent and identically distributed)的零均值方差为1的复圆高斯随机变量; 纹理分量 τ_t 是服从分布 f_t 的非负随机变量,用来描述不同距离单元间杂波功率水平的起伏。根据SIRV模型可知, $\boldsymbol{\eta}_t$ 和 τ_t 是相互独立的,且 $\boldsymbol{\eta}_t$ 的归一化协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 表示为

$$\boldsymbol{\Sigma} = E\{\boldsymbol{\eta}_t \boldsymbol{\eta}_t^H\}, \quad t=1, \dots, K \quad (3)$$

其中 $\boldsymbol{\Sigma}$ 为正定的Hermitian矩阵。

3. ADT-SSI检测器

对于占据 K 个距离单元稀疏散射点目标的回波,可以分为两部分,一部分是存在目标强散射点的回波,另一部分是纯杂波回波。对于雷达目标检测,通常认为较强的回波存在目标散射点,而较弱的回波为不含目标散射点。这样可以对回波序列进行排序,若目标散射点个数为 h_0 ,则利用序列中最大的 h_0 个值进行积累,再与阈值进行比较,就形成文献[10]提出的MSDD检测器。MSDD在已知目标散射点个数时具有较好的检测性能,而当目标散射点个数未知时,需要事先进行估计,当估计值与真实值不匹配时,存在一定的检测性能损失,特别地当估计值 $h_e < h_0$ 时,由于部分存在目标散射点的距离单元没有被积累,MSDD存在较大的检测损失,这一点将在后面的仿真实验中得到验证。针对该问题,本节给出一种基于AD检验的目标散射点个数估计方法。

3.1. ATD-SSI检测器

令集合 Θ_{h_0} 表示存在目标散射点的距离单元下标的集合, h_0 表示目标强散射点所占距离单元个数, h_e 表示 h_0 的估计值。在未知 α_t 和 f_t 的条件下,对SDD进行修正,可得MSDD的检测统计量为[10]

$$\lambda_{\text{MSDD}} = -2(N-1) \sum_{t \in \Theta_{h_0}} \ln(1-w_t) \quad (4)$$

其中,

$$w_t = \frac{|\mathbf{p}^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{z}_t|^2}{(\mathbf{z}_t^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{z}_t)(\mathbf{p}^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{p})}, \quad t=1, \dots, K \quad (5)$$

将 w_t 按从小到大的顺序排列,可得有序序列 $w_{(1)} \leq w_{(2)} \leq \dots \leq w_{(K)}$ 。利用 $w_{(k)}$, $k=1, 2, \dots, K$ 中最大的 h_0 个值进行积累可得SSI检测统计量为:

$$\lambda_{\text{SSI}} = -2(N-1) \sum_{k=K-h_0+1}^K \ln(1-w_{(k)}) \quad (6)$$

当 $h_0=K$ 时, SSI退化为NSDD[9]

$$\lambda_{\text{NSDD}} = -2(N-1) \sum_{k=1}^K \ln(1-w_{(k)}) \quad (7)$$

当目标散射点个数未知时,可以利用AD检验对强散射点个数进行估计,再对强散射点进行积累,这时检测统计量为

$$\lambda_{\text{ADT-SSI}}(h_e) = -2(N-1) \sum_{k=K-h_e+1}^K \ln(1-w_{(k)}) \quad (8)$$

因此, ATD检测器可以表示为

$$\lambda_{\text{ADT-SSI}}(h_e) \begin{matrix} H_1 \\ > T_{h_e} \\ < \\ H_0 \end{matrix} \quad (9)$$

式中, T_{h_e} 表示 h_e 和强散射点积累对应的检测门限。

由于ATD-SSI在本质上与MSDD具有一致性, 因此由文献[10]的分析可知, 与MSDD类似, ATD-SSI也具有CFAR特性。比较式(8)和式(4)可知, ATD-SSI与MSDD的主要区别在于 h_e 是根据实际的目标强散射点密度自适应变化的, 不需要事先知道散射点密度的先验信息, 提高了检测器对未知散射点先验信息目标检测的鲁棒性。

3.2. 强散射点个数估计

令 $u_k = -2(N-1)\ln(1-w_k)$, 则在 H_0 假设下, u_k 的概率密度函数为^[9]

$$f_u(u) = \begin{cases} \frac{1}{2} e^{-u/2} & u \geq 0, \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

即可以认为 u_k 是服从均值为2的指数分布的随机变量, 因此, u_k 累积分布函数为

$$F_u(u) = \begin{cases} 1 - e^{-u/2} & u \geq 0, \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

令 $x_k = F_u(u_k)$, 则 x_k 在区间 $[0, 1]$ 上服从均匀分布。由于 $g(w) = -2(N-1)\ln(1-w)$ 和 $F_u(u)$ 在其定义域区间上是单调递增的函数, 而 $w_{(1)} \leq w_{(2)} \leq \dots \leq w_{(K)}$, 因此, $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(K)}$, AD检验的统计量可以表示为

$$A_K = -K - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (2i-1) \ln[x_{(i)}(1-x_{(K+1-i)})] \quad (12)$$

A_K 表示 $\{x_k\}$ 与均匀分布的适应程度, A_K 越小表示适应度越好。当目标不存在时, x_k 服从均匀分布, A_K 具有较小的值; 当有目标存在时, 由于强散射点的作用, u_k 不再服从均值为2的指数分布, x_k 偏离均匀分布, 从而 A_K 值也较大。由于强散射点回波对应序值较大的 x , 因此考虑 $n(n=1, \dots, K)$ 个最小的 x , 计算其AD检验的统计量

$$A_n = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \ln[x_{(i)}(1-x_{(n+1-i)})] \quad (13)$$

可以认为 A_n ($n=1, \dots, K$) 达到最小值时对应的 n 为杂波的个数, 剩余的为强散射点, 考虑强散射点个数的估计值 $h_e \in \{1, 2, \dots, K\}$, 以及强散射点个数估计值略大于真实

值时MSDD具有更好的检测性能(这一点将在后面的仿真实验中得到验证), 因此强散射点个数估计值可表示为

$$h_e = K - \arg \min_n A_n + 1 \quad (14)$$

式中, $\arg \min_n A_n$ 表示取 A_n 最小值对应的 n 。

4. 性能分析

本节对MSDD和ATD-SSI进行了比较分析。仿真中, 采用 Γ 分布来表示混合分布 f_τ

$$f_\tau(\tau) = (L/b)^L \tau^{L-1} e^{-(L/b)\tau} / \Gamma(L), \quad \tau \geq 0 \quad (15)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 是Gamma函数, b 是均值, L 用来控制与正态统计量偏离的程度。

K 个距离单元内每个距离单元的目标平均功率为 σ_s^2 , 杂波平均功率为 σ_c^2 。有目标散射点的距离单元 ($t \in \Theta_{h_0}$) 回波用方差为 $\varepsilon_t \sigma_s^2 K$ 的独立零均值复圆高斯随机变量建模, 其中 ε_t 表示距离单元 t 的目标能量占目标总能量的比例。本文考虑几种典型的MDS模型, ε_t 的具体取值如表1所示。

表1 不同MDS模型的 ε_t 值。

目标距离单元	1	2	...	h_0
Model. 1	$1/h_0$	$1/h_0$	$1/h_0$	$1/h_0$
Model. 2	0.5	$0.5/(h_0-1)$	$0.5/(h_0-1)$	$0.5/(h_0-1)$
Model. 3	0.9	$0.1/(h_0-1)$	$0.1/(h_0-1)$	$0.1/(h_0-1)$
Model. 4	0.99	$0.01/(h_0-1)$	$0.01/(h_0-1)$	$0.01/(h_0-1)$

当 K, N, L 取不同值时, 文献[10]对MSDD的检测性已经进行了详细的分析, 因此, 本文主要比较分析对不同MDS模型及散射点个数估计失配时对MSDD检测性能的影响, 以及ATD-SSI的检测性能, 不失一般性, 假设 $K=15, N=2, L=1, P_{fa}=10^{-4}$ 。信杂比定义为[10]:

$$SCR = (p^H \Sigma^{-1} p) \sigma_s^2 / \sigma_c^2 \quad (16)$$

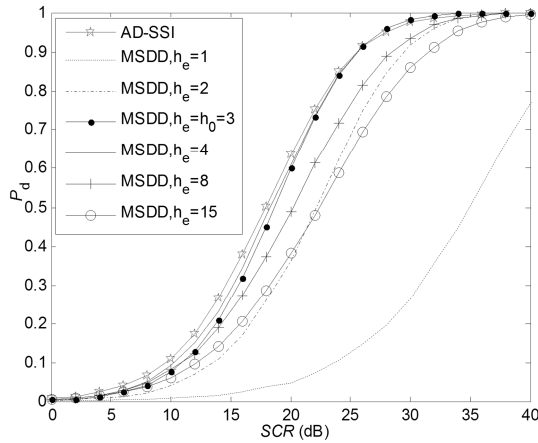
当 $K=15, P_{fa}=10^{-4}$ 时, 表2给出了 h_0 取不同值时的MSDD检测阈值。

表2 MSDD的检测阈值, $K=15, P_{fa}=10^{-4}$ 。

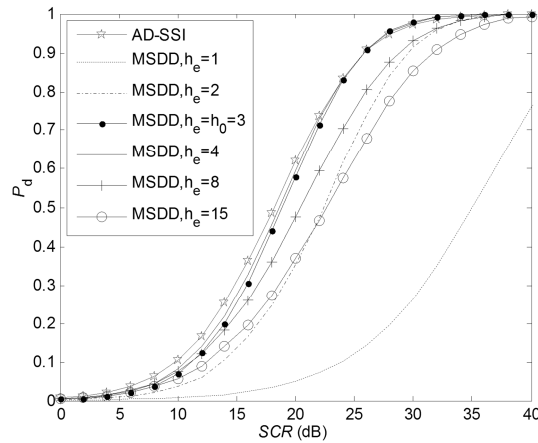
h_0	1	2	3	4	5	6	7	8
T	23.8	32.5	39.1	44.6	49.1	52.9	56.2	58.1
h_0	9	10	11	12	13	14	15	
T	61.2	63.1	64.6	65.8	66.7	67.3	67.6	

分别采用表1中的4种MDS模型, 图1(a)~图1(d)分析了目标散射点个数估计值 h_e 对MSDD检测性能的影响并与ATD-SSI进行了比较, 其中, $h_0=3$ 。结果表明: 目标能量均匀分布(Model. 1)时, MSDD和ATD-SSI的检测性能最好, 目标能量越集中, 检测性能越差。对于不同的目标模型, 当

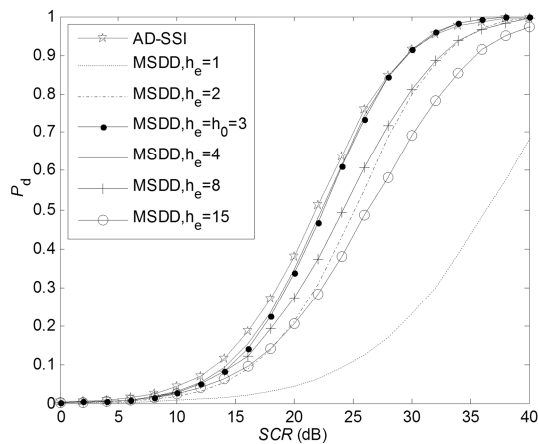
散射点个数估计值略大于真实值时 ($h_e=4$)，MSDD具有最佳的检测性能，当散射点个数估计小于真实值时，MSDD信杂比损失比较严重，然而，这一现象随着散射能量向单个距离单元集中时得到改善。由图1(d)可以看出，即使99%的能量集中于一个单元时，当散射点个数估计值小于实际值时，也会出现较大的信杂比损失。对于四种不同的目标模型，ATD-SSI不需要事先知道目标散射点个数，以及散射点的强弱关系，而其检测性能优于MSDD散射点个数估计匹配时的检测性能。



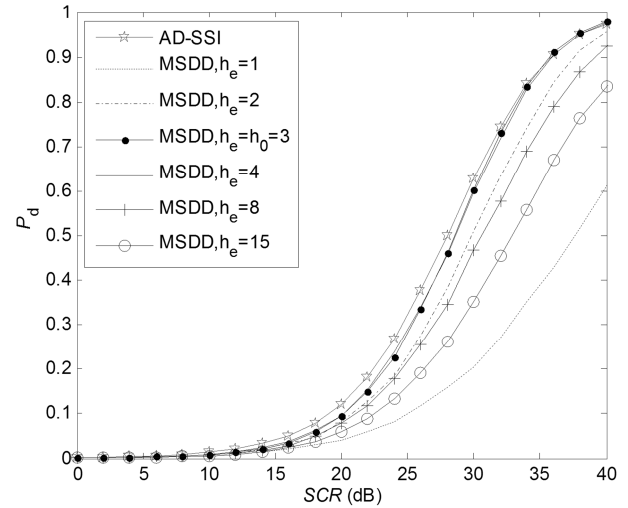
(a) Model 1.1



(b) Model 1.2



(c) Model 1.3



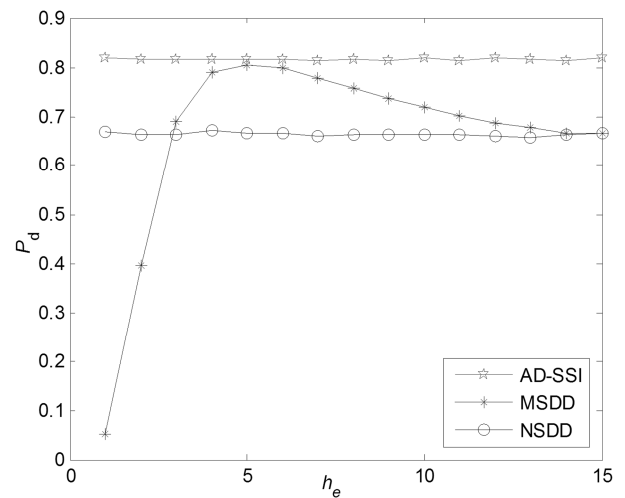
(d) Model 1.4

图1 MSDD和ATD-SSI与SCR的关系曲线, $h_0=3$ 。

表3为某实测目标功率归一化一维距离像，该目标有4个主散射点，分布在不同的距离单元内，且不同散射点的强度不同，针对该目标，图2给出了MSDD检测概率与散射点个数估计值的关系曲线，并与ATD-SSI和NSDD检测性能进行比较，其中 $N=2$, $L=1$, $P_{fa}=10^{-4}$, $SCR=20$ dB。从图2可以看出，当散射点个数估计值小于目标实际散射点个数时，MSDD存在严重的检测损失，这与图1的结果是一致的；当散射点个数估计值略大于实际值时，MSDD的检测性能略优于散射点个数估计匹配时的检测性能，散射点个数估计值继续增大时，MSDD的检测性能下降，当 $h_e=K$ 时，MSDD就等价于NSDD。ATD-SSI能根据回波序列自适应的估计目标散射点个数，具有最佳的检测性能。

表3 某实测目标功率归一化一维距离像。

距离单元编号	1	2	3	4	5	6	7	8
归一化功率	0	0.415	0	0	0.060	0	0	0
距离单元编号	9	10	11	12	13	14	15	
归一化功率	0	0	0.305	0	0.220	0	0	

图2 P_d 与 h_e 的关系曲线, $h_0=3$, $SCR=20$ 。

5. 结束语

本文研究了SIRV非高斯杂波背景下的距离扩展目标检测问题。针对MSDD检测器在估计目标散射点个数估计失配时存在一定检测损失的问题,提出了一种能自适应估计目标散射点个数的MSDD检测器(ATD-SSI)。针对不同的MDS目标模型分析了MSDD在散射点估计匹配和失配时的性能,并和ATD-SSI比较,结果表明MSDD得检测性能随着目标能量向单个距离单元的集中而下降,并得出,即使99%的能量集中于一个单元时,当散射点个数估计值小于实际值时,也会出现较大的信杂比损失,而ATD-SSI对于不同的MDS目标模型都具有较好的检测性能。最后,对MSDD的失配性能进行了分析,并与ATD-SSI和NSDD进行比较,结果表明,MSDD在散射点个数估计小于实际值时存在严重的检测损失,散射点个数估计大于实际值时的检测性能要优于NSDD,其中,略大于实际值时能获得比估计匹配时更优的检测性能,而ATD-SSI能根据回波序列自适应的估计目标散射点个数,不需要已知目标散射点个数的先验信息,具有较优的检测性能。

参考文献

- [1] 顾新锋, 简涛, 何友, 等. 局部均匀背景中距离扩展目标的GLRT检测器及性能分析[J]. 电子学报, 2013, 41(12): 2367-2373.
- [2] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波下距离扩展目标检测器的失配性能分析[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1478-1482.
- [3] Hughes P K. A high-resolution radar detection strategy [J]. IEEE Trans Aerospace Electron System, 1983, (19): 663-667.
- [4] Gerlach K, Steiner M J. Adaptive detection of range distributed targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(7): 1844-1851.
- [5] Gerlach K, Steiner M, Lin F C. Detection of a spatially distributed target in white noise [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(7): 198-200.
- [6] Conte E, De Maio A, Ricci G. GLRT-based adaptive detection algorithms for range-spread targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(7): 1336-1348.
- [7] 戴奉周, 刘宏伟, 吴顺君. 一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2488-2492.
- [8] 顾新锋, 简涛, 何友, 等. 协方差矩阵结构的广义近似最大似然估计[J]. 应用科学学报, 2013, 31(6): 585-592.
- [9] Gerlach K. Spatially distributed target detection in non-Gaussian clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 926-934.
- [10] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 非高斯杂波下修正的SDD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).
- [11] Norouzi Y, Gini F, Nayebi M M. Non-coherent radar CFAR detection based on goodness-of-fit tests [J]. IET Radar Sonar Naving, 2007, 1(2): 98-105.