

距离扩展目标的双门限恒虚警检测器及性能分析

顾新锋 简涛 何友*

海军航空工程学院信息融合技术研究所 烟台 264001

摘要: 针对普通积累检测器检测稀疏散射点目标存在“坍塌损失”以及依赖于散射点密度的二元积累(SDD-BI)检测器检测密集散射点目标存在信杂比损失的问题, 该文充分利用目标的散射点密度及幅度信息, 提出了一种距离扩展目标的双门限恒虚警检测器(DT-CFAR), 在高斯杂波背景下推导了 DT-CFAR 虚警概率和检测概率与检测门限关系的解析表达式, 并给出了最优第1门限的确定方法。仿真结果表明, DT-CFAR 对不同散射点密度目标都具有较优的检测性能, 并且对散射点密度估计失配具有鲁棒性。

关键词: 目标检测; 距离扩展目标; 双门限; 恒虚警率

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1318-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01094

Double Threshold CFAR Detector of Range-spread Target and Its Performance Analysis

Gu Xin-feng Jian Tao He You

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

Abstract: For the problem of normal integrator exists serious “collapsing loss” when detecting sparse scatterer targets, and Scatterer Density Depend-Binary Integrator (SDD-BI) exists signal to clutter ratio loss when detecting dense scatterer targets, a Double Threshold-Constant False Alarm Ratio (DT-CFAR) detector of range-spread target is proposed by using the density and amplitude of a target scatterer. The formula relating false alarm probability and detection probability to detection threshold is deduced in the Gaussian clutter background, and the optimal first threshold for different target parameters is given. Experiment results show that DT-CFAR has better detection performance for diverse scatterer density targets and has robustness when the scatter density of a target is estimated mismatching.

Key words: Target detection; Range-spread target; Double threshold; Constant False Alarm Rate (CFAR)

1 引言

早期的雷达由于距离量化精度较低, 目标尺寸远小于雷达的距离量化单元宽度, 利用雷达对目标进行检测时, 通常把目标看成是一个点, 采用点目标模型进行建模, 并形成了一系列的点目标检测方法^[1]。随着技术的进步, 现代雷达具有较高的距离分辨率, 其分辨单元尺寸已远小于目标尺寸, 这种雷达称为高分辨率雷达, 其目标回波分布在多个距离单元中, 形成距离扩展目标^[2]。这时, 如果仍采用传统的点目标检测方法, 一方面目标回波能量没有充分利用, 高分辨率的优势得不到发挥, 另一方面, 由于目标的部分能量分散到参考单元中, 反而降低了目标的检测概率^[3]。提高雷达分辨率, 并采用合适

的方法对目标所占据的多个距离单元回波能量进行积累, 可以显著提高目标的检测概率^[4-11], 其中, 文献[4-8]利用所有距离单元回波能量进行积累, 这种积累检测器对密集散射点目标具有较好的检测性能, 而对于稀疏散射点目标, 由于累积了不含强散射点距离单元能量, 存在一定的“坍塌损失”。文献[9]采用了二元积累检测方法, 这种检测器具有结构简单, 易于实现的特点, 由于没有考虑目标散射点的密度信息, 对于稀疏散射点目标, 存在严重的检测性能损失; 针对这一问题, 文献[10]利用散射点的展布特性, 研究了最优二元检测方法, 而文献[11]利用散射点的密度信息, 提出了依赖于散射点密度的二元积累检测器(Scatterer Density Dependent-Binary Integrator, SDD-BI), 这两种方法对不同散射点密度目标都能进行有效的检测, 但需要已知目标散射点密度的先验信息, 并且第2门限检测没有利用散射点的幅度信息, 存在一定的信噪比损失。

2011-10-21 收到, 2011-12-23 改回

国家自然科学基金(61032001,61102166)资助课题

*通信作者: 何友 ncif2009@126.com

为增强高分辨率雷达对不同散射点密度目标检测的鲁棒性, 以及进一步提高目标的检测概率, 本文充分利用目标散射点的密度和幅度信息提出了一种双门限恒虚警(Double Threshold-Constant False Alarm Rate, DT-CFAR) 检测器, 其第 1 门限检测和第 2 门限检测都采用了恒虚警检测, 并得到了检测器在高斯杂波背景下虚警概率与检测门限关系的解析表达式。文章结构安排如下: 第 2 节是检测器的设计, 第 3 节对检测器进行理论分析, 第 4 节针对不同散射点密度的目标模型和实际目标 1 维距离像, 分析检测器的检测性能, 最后是总结。

2 DT-CFAR 检测器设计

假设雷达只发射 1 个脉冲。在接收端, 对这个脉冲进行匹配滤波(或是脉冲压缩), 这样目标的每个散射中心都能够被分解^[4]。目标占据 J 个距离单元, 每个散射点占据 1 个距离单元, 各散射点回波及杂波回波相互独立, 对各散射点回波采用复随机变量建模, 则对距离扩展目标的检测可采用如下二元假设检验来表示:

$$\left. \begin{aligned} H_0 : z_r &= c_r \\ H_1 : z_r &= s_r + c_r \end{aligned} \right\} r = 1, 2, \dots, J \quad (1)$$

式(1)中, H_0 表示目标不存在, H_1 表示目标存在, z_r 表示第 r 个距离单元的接收信号, s_r 表示第 r 个距离单元的目标回波信号, c_r 表示第 r 个距离单元的杂波回波信号。对每个距离单元做平方率检波并归一化得到 $d_r = |z_r|^2 / \sigma^2$, σ^2 为雷达 I/Q 通道中杂波的方差。当信号幅度信息完全未知时, 可以采用广义似然比检验判别目标有无, 其等价的检测器为积累检测器, 即

$$\left. \begin{aligned} H_1 \\ \sum_{r=1}^J d_r > d_0 \\ H_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中, d_0 为检测门限。对于密集散射点目标, 积累检测器有最佳的检测性能。而对于实际目标, 只少数的几个距离单元内存在强散射点回波, 即实际目标为稀疏散射点目标, 这时如仍用所有单元回波进行积累, 由于积累了不含目标散射点的距离单元回波, 使得平均信杂比降低, 从而产生一定的信杂比损失, 这种损失称之为“坍塌损失”^[12]。

如果只利用含目标强散射点的距离单元回波进行积累, 就可以有效地克服“坍塌损失”, 但对于不同的目标, 或目标相对于雷达的姿态角不同, 其强散射点所在的距离单元位置也就不同, 基于此, 本

文先设置第 1 门限, 进行强散射点的检测, 然后, 将强散射点的回波减去第 1 门限后, 进行积累, 与第 2 门限比较判别目标有无, 其第 1 门限和第 2 门限的设定都采用恒定的虚警概率, 因此, 称之为双门限恒虚警检测器, 具体过程如下:

第 1 步 强散射点的 CFAR 检测:

对每个距离单元采用如下二元假设检验。

$$\left. \begin{aligned} h_0 : z_r &= c_r \\ h_1 : z_r &= s_r + c_r \end{aligned} \right\} r = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

式(3)中, h_0 表示距离单元内不存在强散射点, h_1 表示距离单元内存在强散射点。对于每个距离单元, 强散射点检测可以表示为

$$\left. \begin{aligned} h_1 \\ > \\ d_r < l_0 \\ h_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中, l_0 表示强散射点检测的门限, 可以根据一定的虚警概率设定。假设目标有 K ($1 \leq K \leq J$) 个距离单元回波超过 l_0 , 用集合表示为 $\Omega = \{d_{r_1}, d_{r_2}, \dots, d_{r_K}\}$, 式中下标 r_k 表示回波中第 k 个超过 l_0 的距离单元编号。

第 2 步 目标的 CFAR 检测

对超过第 1 门限的回波进行消减积累, 令

$D = \sum_{k=1}^K (d_{r_k} - l_0)$, 则第 2 门限检测可以表示为

$$\left. \begin{aligned} H_1 \\ > \\ D < L_0(K) \\ H_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5), 检测器可以表示成如式(6)所示。

$$\left. \begin{aligned} H_1 \\ \sum_{r=1}^J (d_r - l_0) u(d_r - l_0) > L_0(K) \\ H_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中, $u(\cdot)$ 表示单位阶跃函数。图 1 为检测器方框图。

特别地, 当第 1 检测门限 $l_0=0$ 时, 式(6)与式(2)等价, 检测器退化为普通的积累检测器, 即积累检测器是本文提出检测器在 $l_0=0$ 时的特例; 当第 2 检测门限 $L_0(K)=0$ 时, 这时 J 次检测中只要有一次超过第 1 门限, 检测器就会做出 H_1 判决, 即认为目标存在, 这时检测器就等价于 J 中取 1 检测器(第 2 门限设置为 1 的二元积累检测器)。

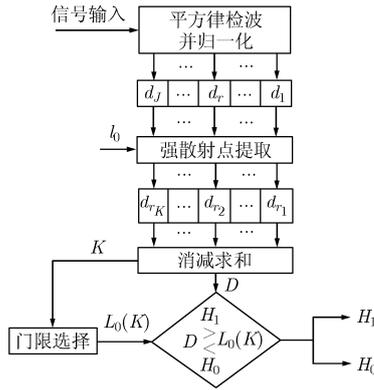


图1 双门限恒虚警检测器方框图

3 检测器理论分析

便于理论分析, 假设目标的散射点密度为 α (每个距离单元存在强散射点的概率), 各强散射点的回波幅度为瑞利分布, 且强度相等; 杂波采用高斯杂波模型。经平方率检波和归一化后, 第 r 个距离单元的回波 d_r 是服从参数为 μ 的指数分布, 其中, $\mu = 2(1 + \lambda)$, λ 为距离单元内目标强散射点的信杂比。当距离单元内不存在目标强散射点时 $\lambda = 0$, $\mu = 2$ 。

3.1 虚警概率及检测门限

当目标不存在时, 易得第 1 门限虚警概率为

$$p_{\text{fa}} = \Pr\{d_r > l_0 | H_0\} = \int_{l_0}^{\infty} 1/2e^{-d_r/2} dd_r = e^{-l_0/2} \quad (7)$$

从而可以得到第 1 步检测门限 $l_0 = -2\ln p_{\text{fa}}$ 。

由于 $\Omega = \{d_{r_1}, d_{r_2}, \dots, d_{r_K}\}$ 是由所有大于 l_0 的独立同分布的随机变量的集合, 因此, d_{r_k} ($k=1, 2, \dots, K$) 也是相互独立的随机变量, 其概率密度函数为^[1]

$$f_{d_{r_k}}(t) = \frac{1}{2}e^{-(t-l_0)/2}, \quad t \geq l_0 \quad (8)$$

令 $d'_{r_k} = d_{r_k} - l_0$, 则 d'_{r_k} 的概率密度函数为

$$f'_{d_{r_k}}(t') = \frac{1}{2}e^{-t'/2}, \quad t' \geq 0 \quad (9)$$

其矩母函数为

$$\Phi_{d'_{r_k}}(u) = (1 + 2u)^{-1} \quad (10)$$

因此, 第 2 步检测统计量 D 的特征函数为

$$\Phi_D(u) = (1 + 2u)^{-K} \quad (11)$$

对式(1)进行反拉普拉斯变换, 可得到 D 的概率密度函数为

$$f_D(w) = \frac{w^{K-1}e^{-w/2}}{2^K \Gamma(K)} \quad (12)$$

因此, 第 2 门限检测的虚警概率为

$$\begin{aligned} P_{2\text{fa}}(K) &= \int_{L_0(K)}^{\infty} \frac{w^{K-1}e^{-w/2}}{2^K \Gamma(K)} dw \\ &= \exp\left(-\frac{L_0(K)}{2}\right) \sum_{i=1}^K \frac{[L_0(K)/2]^{K-i}}{(K-i)!} \end{aligned} \quad (13)$$

因为只要有回波超过第 1 门限, 就会进入第 2 步的判决, 而超过第 1 门限的回波个数 K 的可能取值为 $K=1, 2, \dots, J$ 。当目标不存在时, 第 1 门限检测出现 K 次虚警的概率为

$$P_{1\text{fa}}(K) = C_J^K p_{\text{fa}}^K (1 - p_{\text{fa}})^{J-K} \quad (14)$$

因此, 检测器总的虚警概率为

$$P_{\text{fa}} = \sum_{K=1}^J P_{1\text{fa}}(K) P_{2\text{fa}}(K) \quad (15)$$

第 2 门限检测也是恒虚警的, 即, $P_{2\text{fa}}(1) = P_{2\text{fa}}(2) = \dots = P_{2\text{fa}}(J) = P_{2\text{fa}}$, 再由式(14)和式(15)可得

$$P_{2\text{fa}} = \frac{P_{\text{fa}}}{\sum_{K=1}^J C_J^K p_{\text{fa}}^K (1 - p_{\text{fa}})^{J-K}} = \frac{P_{\text{fa}}}{1 - (1 - p_{\text{fa}})^J} \quad (16)$$

由式(13)和式(16)可得

$$P_{\text{fa}} = [1 - (1 - p_{\text{fa}})^J] \exp\left(-\frac{L_0(K)}{2}\right) \sum_{i=1}^K \frac{[L_0(K)/2]^{K-i}}{(K-i)!} \quad (17)$$

由式(13)可知, 当 $P_{2\text{fa}}=1$ 时, 即 $L_0(K)=0$ 时, 第 1 检测门限虚警概率 p_{fa} 达到最小值 $1 - (1 - P_{2\text{fa}})^{1/J}$, 这时第 1 检测门限 l_0 达到最大值 $l_{0\text{max}} = -2\ln[1 - (1 - P_{2\text{fa}})^{1/J}]$ 。因此, 第 1 检测门限的取值区间为 $[0, l_{0\text{max}}]$ 。

3.2 检测概率分析

当目标存在时, 用 α 表示第 r 个距离单元内存在目标强散射点的概率, 则第 1 门限检测概率为

$$\begin{aligned} p_d &= \Pr\{d_r > l_0 | H_1\} = \alpha \Pr\{d_r > l_0 | h_1\} \\ &+ (1 - \alpha) \Pr\{d_r > l_0 | h_0\} \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中, $\Pr\{d_r > l_0 | h_1\} = e^{-l_0/(2+2\lambda)} = p_{\text{fa}}^{1/(1+\lambda)}$, $\Pr\{d_r > l_0 | h_0\} = p_{\text{fa}}$, 因此, 式(18)可表示为

$$p_d = \alpha p_{\text{fa}}^{1/(1+\lambda)} + (1 - \alpha) p_{\text{fa}} \quad (19)$$

则检测到有 K 个距离单元回波超过第 1 检测门限的概率为

$$P_{1d}(K) = C_J^K p_d^K (1 - p_d)^{J-K} \quad (20)$$

经过第 1 门限检测后, 得到 K 个距离单元超过第 1 门限, 对于每个距离单元存在两种可能: 一种是该单元存在强散射点, 并且该散射点回波超过第 1 门限, 第 2 种可能就是虚警。因此, 每个单元存在强散射点回波的概率为 $\beta = \alpha p_{\text{fa}}^{1/(1+\lambda)} / (\alpha p_{\text{fa}}^{1/(1+\lambda)} + (1 - \alpha) p_{\text{fa}})$ 。 K 个单元中存在 m 个目标强散射点的概率为 $C_K^m \beta^m (1 - \beta)^{K-m}$, 相应得检测统计量 $D = \sum_{k=1}^K (d_{r_k} - l_0)$ 的矩母函数为

$$M_D(u | K, m) = \left(\frac{1}{1 + 2(1 + \lambda)u} \right)^m \left(\frac{1}{1 + 2u} \right)^{K-m} \quad (21)$$

对式(21)进行反拉普拉斯变换, 可得到 D 的概率密

度函数为

$$f_D(w | K, m) = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{C_{J-2-i}^{K-m-1} G(i+1, 2(1+\lambda))}{(-1)^{m-1-i} (1+\lambda)^{-(K-m)} \lambda^{K-1-i}} + \sum_{i=0}^{K-m-1} \frac{C_{K-2-i}^{m-1} G(i+1, 2)}{(-1)^m (1+\lambda)^{-(K-m-1-i)} \lambda^{K-1-i}} \quad (22)$$

式(22)中, $G(i+1, b)$ 表示参数为 $(i+1, b)$ 的 Gamma 分布概率密度函数

$$G(i+1, b) = \frac{w^i e^{-w/b}}{b^{i+1} i!} \quad (23)$$

b 分别为 $2(1+\lambda)$ 和 2 。因此有 K 个距离单元超过第 1 门限时第 2 门限检测的检测概率为

$$P_{2d}(K) = \sum_{m=0}^K C_K^m \beta^m (1-\beta)^{K-m} \int_{T_0(k)}^{\infty} f_D(w | K, m) dw \quad (24)$$

这时, 总的检测概率为

$$P_d = \sum_{K=1}^J P_{1d}(K) P_{2d}(K) \quad (25)$$

3.3 检测器的两个特例

特别地, 当第 1 检测门限 $l_0=0$ 时, DT-CFAR 检测器退化为积累检测器。由式(7)和式(18)可得第 1 门限检测的虚警概率和检测概率分别为 $p_{fa}=1$ 和 $p_d=1$, 因此, $K=J$ 。将 $p_{fa}=1$ 代入式(16)得 $P_{fa} = P_{2fa}(J)$, 即

$$P_{fa} = \int_{L_0(J)}^{\infty} \frac{w^{J-1} e^{-w/2}}{2^J \Gamma(J)} dw = \exp\left\{-\frac{L_0(J)}{2}\right\} \sum_{i=1}^J \frac{[L_0(J)/2]^{J-i}}{(J-i)!} \quad (26)$$

将 $p_d=1$ 代入式(20)得

$$P_{1d}(K) = \begin{cases} 0, & K = 1, 2, \dots, J-1 \\ 1, & K = J \end{cases} \quad (27)$$

再将式(27)代入式(25)得

$$P_d = P_{2d}(J) = \sum_{m=0}^J C_J^m \beta^m (1-\beta)^{J-m} \int_{T_0(k)}^{\infty} f_D(w | J, m) dw \quad (28)$$

当第 2 检测门限 $L_0(K)=0$ 时, DT-CFAR 检测器退化为 J 中取 1 检测器。将 $L_0(K)=0$ 代入式(9)得 $P_{2fa}(K)=1$ 。再将 $P_{2fa}=1$ 代入式(12)可得第 1 门限

虚警概率为

$$p_{fa} = 1 - (1 - P_{fa})^{1/J} \quad (29)$$

将 $P_{2fa}(K)=1$ 和式(16)代入式(18)可得检测概率为

$$P_d = \sum_{K=1}^J C_J^K p_d^K (1-p_d)^{J-K} \quad (30)$$

4 检测器性能分析

由式(19)~式(25)可知检测器的检测概率 P_d 与强散射点的信杂比 λ 、目标占据单元数 J 、目标散射点密度 α 、第 1 门限检测虚警概率、超过第 1 门限的回波个数 K 以及相应的第 2 检测门限 $L_0(K)$ 有关。由式(17)、式(7)和可知 $L_0(K)$ 与检测器虚警概率 P_{fa} 、第 1 检测门限 l_0 有关。目标信杂比定义为 J 个距离单元内所有强散射点的功率与单个距离单元内杂波功率的比, 即

$$SCR = \frac{J\alpha\sigma_s^2}{\sigma_c^2} = J\alpha\lambda \quad (31)$$

则 $\lambda = SCR / (J\alpha)$ 。因此, P_d 可以用 $(SCR, l_0, \alpha, P_{fa}, J)$ 作为参数的函数来表示, 即

$$P_d = g(SCR, l_0, \alpha, P_{fa}, J) \quad (32)$$

当 P_{fa}, J, α 确定时, 可以得到不同 SCR 对应的 P_d 与 l_0 的关系。图 2 给出了 $P_{fa}=10^{-4}, J=15, \alpha=0.2$ 时 P_d 与 l_0 的关系曲线。由图 2 可以看出, 当 SCR, α, P_{fa}, J 确定时, 选择合适的 l_0 可以使检测器达到最佳的检测性能, 最优 l_0 取值可以表示为

$$l_{0opt}(SCR, \alpha, P_{fa}, J) = \arg \max_{l_0} g(SCR, l_0, \alpha, P_{fa}, J) \quad (33)$$

式(33)表示参数 SCR, α, P_{fa}, J 不变, 改变参数 l_0 , 取使得 $g(SCR, l_0, \alpha, P_{fa}, J)$ 达到最大值时的 l_0 。例如, 当 SCR=14 时, l_0 取 4.767 可使得 P_d 达到最大值。根据式(33)可以计算得到参数 SCR, α, P_{fa}, J 取不同值时对应的最优 l_0 。表 1 给出了 $P_{fa}=10^{-4}, SCR=14$ 时目标所占据不同距离单元数及 α 取不同值时对应的最优 l_0 取值。由表 1 可以看出, 最优 l_0 取值随着 α 增大而减小, 当 $\alpha > 0.5$ 时, l_0 取 0 时检测器有最佳的检测性能, 这表明当目标所占据的单元中

表 1 $P_{fa}=10^{-4}, SCR=14$ 时最优 l_0 取值

J	α									
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
10	23.025	10.362	7.675	6.332	4.605	3.070	1.974	1.151	0.512	0
15	23.837	8.740	6.886	4.767	3.178	2.119	1.362	0.596	0	0
25	10.938	7.458	4.972	3.232	2.188	1.326	0.426	0	0	0
40	10.319	5.805	3.869	2.741	1.548	0.323	0	0	0	0

一般以上的距离单元存在强散射点时,采用积累检测器就能得到最佳的检测性能。进一步比较分析图2和表1,可以得出目标散射点密度 α 是影响最佳 l_0 取值的关键因素,其次是目标占据单元数,而信杂比对最佳 l_0 取值的影响较弱。

图3~图5给出了 $P_{fa}=10^{-4}$, $J=40$, α 分别为0.05(极稀疏散射点目标), 0.2(稀疏散射点目标)和0.5(中等密集散射点目标)时,本文检测方法(DT-CFAR), 积累检测器(Integrator)和SDD-BI的检测性能比较曲线。DT-CFAR检测器的第1门限查表1得到, SDD-BI检测器的第2门限分别取1, 2和5。从图3可以看出,对于极稀疏散射点目标,DT-CFAR检测器略优于SDD-BI检测器而明显优于积累检测器,这是因为DT-CFAR和SDD-BI利用了散射点密度的先验信息,而积累检测器由于积累了不含目标强散射点的距离单元回波,存在一定的“坍塌损失”。图4表明,DT-CFAR充分利用了目标散射点密度和回波幅度信息,其性能明显优于SDD-BI检测器和积累检测器。图5则表明,对于中等密集散射点目标,DT-CFAR检测器等价为积累检测器而明显优于SDD-BI检测器,这是因为当 $\alpha=0.5$ 时DT-CFAR检测器的最优第1门限 $l_0=0$,这时DT-CFAR检测器等价为积累检测器,而SDD-BI检测器由于没有利用幅度信息,存在一定的信杂比损失。

图3~图5的分析结果表明,当目标散射点密度已知时DT-CFAR检测器具有最佳的检测性能,而对于实际的目标,即使已知目标1维距离像(图6为某实测目标的归一化1维距离像),也很难得到目标散射点密度 α 的确切值,这时需要先对目标散射点密度进行估计,然后根据估计值确定检测器的最佳参数。

图7给出了DT-CFAR检测器、SDD-BI检测器的检测概率与目标散射点密度估计值的关系曲线并与积累检测器进行比较,其中,目标散射点密度估计值取1/64到0.5(间隔为1/64),信杂比SCR设定为15 dB。从图7可以看出,当目标散射点密度估计值取3/32时DT-CFAR检测器具有最大的平均检测概率,而当散射点密度估计失配时,当 $\alpha < 0.3$ 时DT-CFAR检测器仍优于SDD-BI检测器和积累检测器,而当 $\alpha \geq 0.3$ 时DT-CFAR检测器等价为积累检测器,这是因为当 $\alpha \geq 0.3$,DT-CFAR检测器的最优第1门限 $l_0=0$,退化为积累检测器。分析图7可知,在散射点密度估计失配时SDD-BI检测器检测性能明显下降,而DT-CFAR检测器仍保持较好的检测性能,这说明DT-CFAR检测器对目标散射点密度估计失配具有较好的鲁棒性。

5 结论

SDD-BI检测器对于稀疏散射点目标具有较优

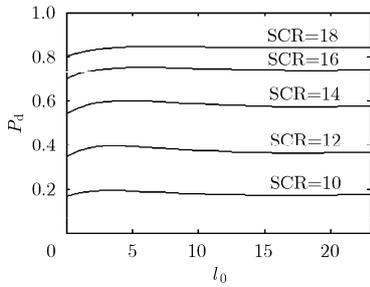


图2 P_d 与 l_0 的关系曲线
 $P_{fa}=10^{-4}$, $J=15$, $\alpha=0.2$

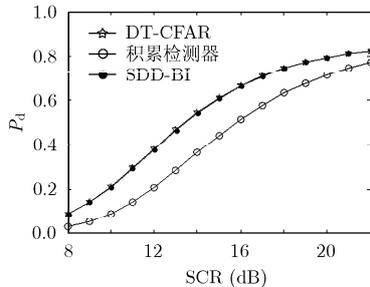


图3 P_d 与SCR的关系曲线
 $P_{fa}=10^{-4}$, $J=40$, $\alpha=0.05$

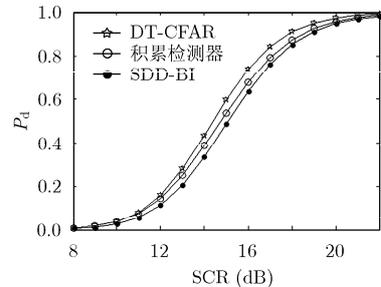


图4 P_d 与SCR的关系曲线
 $P_{fa}=10^{-4}$, $J=40$, $\alpha=0.2$

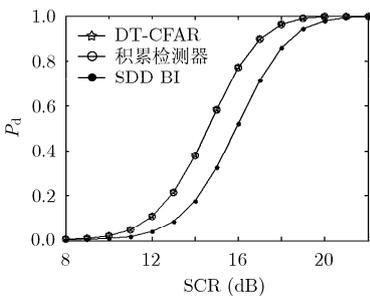


图5 P_d 与SCR的关系曲线
 $P_{fa}=10^{-4}$, $J=40$, $\alpha=0.5$

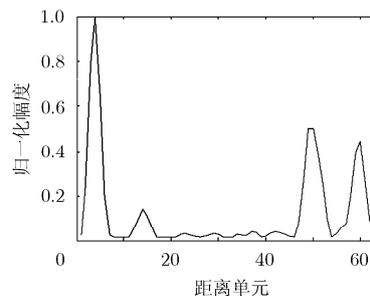


图6 某目标的归一化1维距离像

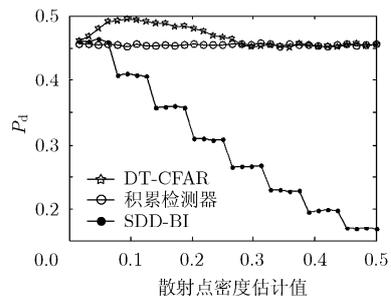


图7 P_d 与散射点密度估计值的关系曲线

的检测性能, 而对于密集散射点目标存在一定的量化损失; 积累检测器对于密集散射点目标具有较好的检测性能, 而对于稀疏散射点目标存在严重的“坍塌损失”。综合这两种检测器的优点, 本文充分利用目标散射点的密度和幅度信息, 提出了 TD-CFAR 检测器, 推导了其虚警概率和检测概率的解析表达式, 并给出了最优第 1 门限的确定方法, 为工程应用提供了必要的理论指导。通过比较 TD-CFAR 检测器、积累检测器和 SDD-BI 检测器对不同散射点密度目标的检测性能得出: 对于不同散射点密集程度目标, 与 SDD-BI 检测器和积累检测器相比, TD-CFAR 检测器都有最佳的检测性能。最后, 对某实测目标 1 维距离像的检测结果表明, TD-CFAR 检测器在散射点密度估计失配时具有较好的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 何友, 关键, 孟祥伟, 等. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 第 2 版, 北京: 清华大学出版社, 2011: 1-4, 115.
He You, Guan Jian, Meng Xiang-wei, et al. Radar Target Detection and CFAR Processing[M]. 2nd Ed, Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 1-4, 115.
- [2] Wehner D R. High-Resolution Radar[M]. 2nd Ed. Boston: MA, Artech House, 1995: 220-221.
- [3] Gerlach K and Steiner M J. Adaptive detection of range distributed targets [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(7): 1844-1851.
- [4] Hughes P K. A high-resolution radar detection strategy [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electron System*, 1983, 19(5): 663-667.
- [5] Bandiera F, Orlando D, and Ricci G. CFAR detection strategies for distributed targets under conic constraints [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(9): 3305-3316.
- [6] Dai F Z, Liu H W, and Wu S J. Generalized adaptive subspace detector for range-Doppler spread target with high resolution radar[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(1): 172-181.
- [7] Jian T, He Y, Su F, et al. High resolution radar target adaptive detector and performance assessment [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(2): 212-218.
- [8] Guan J and Zhang X L. Subspace detection for range and Doppler distributed targets with Rao and Wald tests [J]. *Signal Processing*, 2011, 91(1): 51-60.
- [9] 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 Xiang-wei, Qu Dong-cai, and He You. CFAR detection for range-extended target in Gaussian background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(6): 1012-1015.
- [10] 陈远征, 周剑雄, 付强. 扩展目标的最优二进制检测[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 26-29.
Chen Yuan-zheng, Zhou Jian-xiong, and Fu Qiang. Optimal binary detection for distributed targets [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 26-29.
- [11] He Y, Gu X F, Jian T, et al. A m out of n detector based on scattering density [C]. IET International Radar Conference 2009 (IET 2009), Guilin, April 20-22, 2009: 1-4.
- [12] Goldman H. Performance of excision CFAR detector in the presence of interferes [J]. *IEE Proceedings-F Radar and Signal Processing*, 1990, 137(3): 163-171.

顾新锋: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为高分辨雷达目标检测.

简涛: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号检测与信号处理.

何友: 男, 1956 年生, 教授, 研究方向为雷达自适应检测方法、多传感器信息融合、模式识别等.