

非高斯杂波下修正的 SDD-GLRT 距离 扩展目标检测器

简 涛, 何 友, 苏 峰, 曲长文

(海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东烟台 264001)

摘 要: 在球不变随机向量非高斯杂波背景下, 针对 SDD-GLRT 方法在统计平均意义下对距离扩展目标进行最优检测所带来的检测损失, 通过充分利用目标散射点的先验信息, 基于有序统计检测理论, 提出了修正的 SDD-GLRT 距离扩展目标检测方法. 理论分析表明, 在不存在目标的假设下, 虚警概率与纹理分量的混合分布、杂波协方差矩阵以及确知信号的方向向量无关, 即修正的 SDD-GLRT 方法具有恒虚警率 (constant false alarm rate, CFAR) 特性. 仿真结果表明, 随着积累脉冲数及目标散射点所占距离单元个数的增加, 修正的 SDD-GLRT 检测性能得到提高. 在散射点分布稀疏条件下, 修正的 SDD-GLRT 的检测性能要明显好于 SDD-GLRT 和 NSDD-GLRT, 且在估计目标散射点个数存在微弱偏差和不同杂波尖峰情况下, 修正的 SDD-GLRT 具有很好的鲁棒性.

关键词: 球不变随机向量; 距离扩展目标检测; 有序统计量; 目标散射点; 鲁棒性

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2662-06

Modified SDD-GLRT Detector for Range-Spread Targets in Non-Gaussian Clutter

JIAN Tao, HE You, SU Feng, QU Chang-wen

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

Abstract: Scatterer density dependent generalized likelihood ratio test (SDD-GIRT) performs well in detecting a spatially distributed target in the presence of additive non-Gaussian clutter, where the clutter is modeled as a spherically invariant random vector (SIRV). But SDD-GLRT is a statistically optimum detector, which results in performance loss in the practical case. Based on the order statistics detection theory, a modified SDD-GLRT detector is proposed, which utilizes a priori knowledge of the scatterer spatial distribution fully. It shows that the probability of false alarm is independent of the underlying mixing distribution, the normalized clutter covariance matrix and the steering vector. Hence the modified SDD-GLRT is a constant false alarm rate (CFAR) detector. The experimental results show that the modified SDD-GLRT detection performance is significantly improved by increasing the number of scatterers or the number of pulses used. For detecting a sparsely distributed target, the modified SDD-GLRT outperforms both of the SDD-GLRT and the NSDD-GLRT. Furthermore, the modified SDD-GLRT is more robust for a moderate mismatch of the expected number of scatterers or different spikiness of the clutter.

Key words: spherically invariant random vector; range spread target detection; order statistics; target scatterer; robustness

1 引言

低分辨率雷达目标回波表现为单一散射点, 称之为点目标^[1]. 而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, 这些散射点主要依赖于目标的距离扩展范围和雷达的距离分辨能力, 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”. 如果用传统点目标检测方法检测距离扩展目标, 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^[2,3]. 针对高斯杂波背景下距离扩展目标的检测, 已获得了许多有效的方法^[3-5]. 其中, 文献[4]考虑了两种检测器: M 中取 1 ($1/M$) 检测器和非相干积累器 (即在整个距离扩展范围上进行非相干积累). 实验分析表明, 当只有少数散射点存在时, $1/M$ 检测器的性能明显优于非相干积累器, 而当有较多的散射点存在时, 非相干积累器具有更好的检测性能. Gerlach 利用目标散射点空间分布密度的先验信息, 采用广义似然比检验提出了高斯杂波背景下的 SDD-GLRT

(Scatterer Density Dependent Generalized Likelihood Ratio Test) 方法^[5], 与最优 M 中取 N 方法相比, 该方法在目标散射点分布未知时具有更好的鲁棒性。

随着雷达分辨率的进一步提高或在低掠地角条件下, 背景杂波已不能再用高斯模型准确表示. 在高分辨率情况下, 雷达会接收到类似于目标的尖峰, 这种含尖峰的杂波可用球不变随机向量(Spherically Invariant Random Vector, SIRV)来建模^[6-8]. 文献[9]在 SIRV 杂波条件下, 针对存在多普勒频移但无距离走动的距离扩展目标, 基于广义似然比检验, 提出了不依赖于目标散射点密度的 NSDD-GLRT 检测器和利用目标散射点密度先验信息的 SDD-GLRT 检测器. SDD-GLRT 在估计散射点数目存在轻微失配条件下具有一定的鲁棒性, 但是该方法是统计平均意义下的最优检测, 未能充分利用目标散射点密度的先验信息, 存在一定的检测损失.

针对这一问题, 本文对 SIRV 杂波下的 SDD-GLRT 检测器进行改进, 充分利用目标散射点分布的先验信息, 基于有序统计检测的相关理论, 提出了修正的 SDD-GLRT(简称 MSDD-GLRT)检测器. 理论分析表明, 在不存在目标的假设下, MSDD-GLRT 检测器的虚警概率只依赖于目标散射点个数、目标的距离扩展范围和积累脉冲数, 而与混合分布、杂波归一化协方差矩阵以及确知信号的方向向量无关, 即该方法具有恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)特性. 实验结果表明, 随着积累脉冲数及目标散射点所占距离单元个数的增加, MSDD-GLRT 的检测性能得到提高; 在估计目标散射点个数存在微弱偏差和不同杂波尖峰情况下, MSDD-GLRT 具有很好的鲁棒性; 并且在散射点稀疏条件下, MSDD-GLRT 的检测性能要明显好于 SDD-GLRT 和 NSDD-GLRT.

2 目标和杂波模型

距离扩展目标回波包含一个或多个散射点. 假设 B 是雷达发射波形的带宽, $\Delta t = 1/B$ 为时间分辨率, 则 $\Delta r = c\Delta t/2$ 为距离分辨率, c 表示光速. 若雷达发送一个包含 N 个相同脉冲的相干脉冲串, 且在 N 个脉冲的持续时间(即一个相干处理时间, Coherent Processing Interval, CPI)内, 目标仍在原距离单元中, 即目标在一个 CPI 内无距离走动. 雷达回波采用复数表示, 目标的第 n 个脉冲回波的相移量为 $(n-1)\phi$, 其中 ϕ 为常数. 根据 $\Delta r = c\Delta t/2$ 所表示的时间与距离的对应关系, 可以认为雷达回波是距离 r 的函数. 由于不同距离单元采样的杂波分量间是相关的, 因此首先对单脉冲回波进行空间白化滤波, 然后再进行检测. 假设从平稳目标接收的第一个脉冲的空间白化输出回波为 $a(r)$, 则移动目标的 N 个脉冲回波可以表示成 $(a(r), e^{j\phi}a(r), e^{2j\phi}a(r), \dots, e^{j(N-1)\phi}a(r))^T$, 其中, 符号“ T ”表示转置.

假设 N 个脉冲杂波回波用 SIRV 分布来建模, 经过空间白化后, 距离单元 r 的第 n 个脉冲杂波回波可以表示成

$$c_n(r) = \sqrt{\Upsilon(r)} \cdot \eta_n(r) \quad (1)$$

式中, $\eta_n(r)$ 是零均值方差为 1 的复圆高斯随机变量, 纹理分量 $\Upsilon(r)$ 是非负随机变量, 服从混合分布 f_τ , $\Upsilon(r)$ 用来描述不同距离单元间杂波功率水平的起伏. 散斑分量 $\eta(r) = (\eta_1(r), \eta_2(r), \dots, \eta_N(r))^T$ 的归一化协方差矩阵 R_0 为

$$R_0 = E\{\eta(r)\eta(r)^H\} \quad (2)$$

其中符号“ H ”表示共轭转置, R_0 对角线元素为 1, 为了简化问题, 本文假设 R_0 已知. 如果 R_0 未知, 可以利用辅助数据获得 R_0 的估计 \hat{R}_0 ^[2].

假设 $\eta(r)$ 和 $\Upsilon(r)$ 在不同距离单元之间是相互独立的, $z_n(r)$ 表示对第 n 个雷达脉冲回波进行空间白化处理后的输出.

令 $z(r) = (z_1(r), z_2(r), \dots, z_N(r))^T$, $c(r) = (c_1(r), c_2(r), \dots, c_N(r))^T$, 且目标方向向量 $s_\phi = (1, e^{j\phi}, e^{2j\phi}, \dots, e^{j(N-1)\phi})^T$. 假设杂波的残留功率比内部噪声大很多, 因此忽略内部噪声的影响, 经过空间白化后目标检测可以表示为二元假设检验

$$\begin{aligned} H_1: z(r) &= a(r)s_\phi + c(r) \\ H_0: z(r) &= c(r) \end{aligned} \quad (3)$$

3 MSDD-GLRT 检测器

假设目标完全包含在 J 个距离分辨单元的距离窗内. 在许多情况下, 目标散射点密度是稀疏的, 散射点只占据 J 个距离单元的一部分, 即目标的“热点”. 距离扩展目标所占据的距离单元的幅值要明显高于其它距离单元, 这为距离扩展目标检测提供了可能. 假设 Θ_0 表示存在目标散射点的距离单元下标的集合, j_0 表示目标散射点所占距离单元个数, 则只需在 Θ_0 确定的距离单元范围内对目标进行检测. 假设混合分布 f_τ 未知, 则每个距离单元的杂波服从具有未知方差 $\Upsilon(r)$ 的条件高斯分布, 即输入杂波仍是非高斯的 SIRV 向量. 假设 $a(r)$ 未知, s_ϕ 已知, 则 $z(r)$ 在不同假设下的联合概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为:

$$\begin{aligned} \prod_{r \in \Theta_0} f(z(r) | H_0) &= \prod_{r \in \Theta_0} \frac{1}{\pi^N [\Upsilon(r)]^N \det(R_0)} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{\Upsilon(r)} z(r)^H R_0^{-1} z(r)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \prod_{r \in \Theta_0} f(z(r) | H_1) &= \prod_{r \in \Theta_0} \frac{1}{\pi^N [\Upsilon(r)]^N \det(R_0)} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{\Upsilon(r)} (z(r) - a(r)s_\phi)^H R_0^{-1} (z(r) - a(r)s_\phi)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\det(\cdot)$ 表示取行列式.

根据广义似然比检验原理, 每个假设下的未知参数可以通过最大似然(Maximum Likelihood, ML)估计获得. 对于给定的 r , 利用 $f(z(r)|H_0)$ 和 $f(z(r)|H_1)$ 的自然对数分别对 $\tau(r)$ 求导, 即令

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial \ln[f(z(r)|H_0)]}{\partial \tau(r)} = -\frac{N}{\tau(r)} + \frac{z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)}{[\tau(r)]^2} \quad (6) \\ 0 &= \frac{\partial \ln[f(z(r)|H_1)]}{\partial \tau(r)} \\ &= -\frac{N}{\tau(r)} + \frac{(z(r) - a(r)s_\phi)^H \mathbf{R}_0^{-1} (z(r) - a(r)s_\phi)}{[\tau(r)]^2} \quad (7) \end{aligned}$$

由式(6)和式(7)可得 $\tau(r)$ 在不同假设条件下的 ML 估计值:

$$H_0: \tau_{ML}(r) = \frac{1}{N} z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r) \quad (8)$$

$$H_1: \tau_{ML}(r) = \frac{1}{N} (z(r) - a(r)s_\phi)^H \mathbf{R}_0^{-1} (z(r) - a(r)s_\phi) \quad (9)$$

$f(z(r)|H_1)$ 的指数项的分子部分可以表示为

$$\begin{aligned} &\left[(z(r) - a(r)s_\phi)^H \mathbf{R}_0^{-1} (z(r) - a(r)s_\phi) \right] \\ &= z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r) - \frac{|s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)|^2}{s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi} \\ &\quad + s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi \left| a(r) - \frac{s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)}{s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi} \right|^2 \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)可知, H_1 假设下 $a(r)$ 的 ML 估计为

$$a_{ML}(r) = \frac{s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)}{s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi} \quad (11)$$

把式(9)和式(11)代入式(5)中, 式(8)代入式(4)中, 可得到广义似然比检验统计量的表达式为:

$$\begin{aligned} \lambda &= \ln \left(\prod_{r \in \mathcal{Q}_1} \frac{f(z(r)|H_1)}{f(z(r)|H_0)} \right) \\ &= -N \sum_{r \in \mathcal{Q}_1} \ln \left[1 - \frac{|s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)|^2}{(z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)) (s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi)} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

由于 N 在式(12)中是固定常数, 根据检测统计量的严格单调性, MSDD-GLRT 的检验统计量可以表示为:

$$\lambda_{MSDD-GLRT} = - \sum_{r \in \mathcal{Q}_1} \ln \left[1 - \frac{|s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)|^2}{(z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)) (s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi)} \right] \quad (13)$$

令

$$w(r) = \frac{|s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)|^2}{(z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)) (s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi)} \quad (14)$$

式(14)右边分子中 $s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)$ 可以看作是观测向量 $z(r)$ 通过权向量为 $\mathbf{R}_0^{-1} s_\phi$ 的匹配滤波器后的输出^[10], 而分母中的 $z(r)^H \mathbf{R}_0^{-1} z(r)$ 和 $s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi$ 均为归一化因子. 通过归一化处理, $w(r)$ 将独立于混合分布 $f_{\mathbf{z}}$

杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_0 以及确知信号的方向向量 s_ϕ . 这在下一节中将进行详细的分析.

$w(r)$ 可以看作是观测向量 $z(r)$ 在匹配滤波后模值平方的归一化, 即 $w(r)$ 代表了观测向量在匹配滤波后的归一化能量. 由于距离扩展目标完全包含在 J 个距离分辨单元的距离窗内, 且距离扩展目标所占据的距离单元的幅值(或能量)要明显高于其它距离单元, 可以通过归一化能量 $w(r)$ 的大小确定 \mathcal{Q}_j , 即利用 $w(r)$, $r = 1, 2, \dots, J$ 中最大的 j_0 个值来确定目标散射点集合.

首先把 $w(r)$, $r = 1, 2, \dots, J$ 按从小到大的顺序排列, 可得序列

$$0 \leq w(r_1) \leq \dots \leq w(r_k) \leq \dots \leq w(r_j) \leq 1 \quad (15)$$

由式(13)可知, MSDD-GLRT 检验统计量可以进一步表示为:

$$\lambda_{MSDD-GLRT} = - \sum_{k=J-j_0+1}^J \ln(1 - w(r_k)) \quad (16)$$

当目标在所有 J 个距离单元内都存在散射点时, $j_0 = J$, MSDD-GLRT 检测器将对所有 J 个距离单元进行积累, 此时的 MSDD-GLRT 检测器将退化为 NSDD-GLRT 检测器^[9].

4 CFAR 特性分析

令

$$u(r) = -2(N-1) \ln(1 - w(r)) \quad (17)$$

由于函数 $g(x) = -2(N-1) \ln(1-x)$ 在区间 $(0, 1)$ 上是单调增函数, 因此也可以通过 $u(r)$, $r = 1, 2, \dots, J$ 中最大的 j_0 个值来确定目标散射点位置的集合 \mathcal{Q}_j .

同样对 $u(r)$, $r = 1, 2, \dots, J$ 按从小到大的顺序排列, 可得序列

$$0 \leq u(r_1) \leq \dots \leq u(r_k) \leq \dots \leq u(r_j) \quad (18)$$

则 MSDD-GLRT 检验统计量可以进一步表示为:

$$\lambda_{MSDD-GLRT} = - \sum_{k=J-j_0+1}^J \frac{u(r_k)}{2(N-1)} \quad (19)$$

在假设 H_0 下, $z(r) = c(r)$, 且 $c_n(r) = \sqrt{\tau(r)} \cdot \eta_n(r)$, 所以 $z(r)$ 的自协方差矩阵为

$$\mathbf{M} = E\{zz^H\} = E\{cc^H\} = \mathbf{R}_0 \quad (20)$$

那么 $\frac{1}{\tau} \mathbf{R}_0^{-1} = \mathbf{M}^{-1}$, 对正定的对称矩阵 \mathbf{M}^{-1} 进行 Cholesky 分解, 则存在一个 $N \times N$ 的矩阵 \mathbf{B} 满足^[11]:

$$\mathbf{M}^{-1} = \frac{1}{\tau} \mathbf{R}_0^{-1} = \mathbf{B}^H \mathbf{B} \quad (21)$$

设 $t = \mathbf{B}s_\phi$, 则 $\|t\|^2 = (\mathbf{B}s_\phi)^H \mathbf{B}s_\phi = s_\phi^H \mathbf{B}^H \mathbf{B}s_\phi = \frac{1}{\tau} s_\phi^H \mathbf{R}_0^{-1} s_\phi$. 对 t 进行保范的 Household 变换, 即存在一个 Household 矩阵 \mathbf{C} 满足

$$CBs_\phi = Ct = \|t\|_{l_0} = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left(s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \right)^{1/2} I_0 \text{ 且 } C^H C = I_N \quad (22)$$

其中, $I_0 = (1, 0, 0, \dots, 0)^T$ 且与 t 具有相同的维数, I_N 是 $N \times N$ 的单位矩阵. 设 $A = CB$, 由式(22)可得

$$As_\phi = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left(s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \right)^{1/2} I_0 \quad (23)$$

假设

$$y(r) = Az(r) \quad (24)$$

由 $B^H B = B^H C^H CB = A^H A$ 可知, 式(21)也可以表示为

$$M^{-1} = \frac{1}{\tau} R_0^{-1} = A^H A \quad (25)$$

由式(24)和式(25)可知, $y(r)$ 的协方差矩阵为

$$E\{yy^H\} = AE\{zz^H\}A^H = AMA^H = I_N \quad (26)$$

式(26)说明 $y_1(r), y_2(r), \dots, y_N(r)$ 是独立同分布 (Independent and Identically Distributed, IID) 的复圆高斯随机变量, 且方差为 1.

将式(23)、(24)和(25)代入式(14), 则 $w(r)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} w(r) &= \frac{|s_\phi^H \left\{ \tau A^H A \right\} z(r)|^2}{\left\{ z(r)^H \tau A^H A z(r) \right\} \left(s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \right)} \\ &= \frac{\tau \left| \sqrt{\tau} A s_\phi \right|^2}{\tau \left\| A z(r) \right\|^2 \left(s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \right)} \\ &= \frac{\left| \left(s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \right)^{1/2} I_0 \right|^2 \left\| y(r) \right\|^2}{\left\| y(r) \right\|^2 \left(s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \right)} \\ &= \frac{|y_1(r)|^2}{\sum_{n=1}^N |y_n(r)|^2} \end{aligned} \quad (27)$$

利用式(27)可得 $u(r)$ 的 PDF 为^[12]

$$f_u(u) = e^{-u/2}, u \geq 0 \quad (28)$$

$u(r)$ 的概率分布函数为:

$$F_u(u) = 1 - e^{-u/2}, u \geq 0 \quad (29)$$

则第 k 个统计量 $u(r_k)$ 的 PDF 为^[13]

$$f_k(u) = \frac{J!}{(k-1)! (J-k)!} F_u^{k-1}(u) [1 - F_u(u)]^{J-k} f_u(u) \quad (30)$$

由式(19)和式(30)可以得到 $\lambda_{\text{MSDD-GLRT}}$ 的 PDF $f_\lambda(x)$, 从而确定给定虚警概率条件下的检测阈值. 由于求解 $f_\lambda(x)$ 的解析式过于复杂, 本文采用 Monte Carlo 方法确定检测阈值.

通过以上的分析可知, $f_\lambda(x)$ 只与 j_0, J 和 N 有关, 而与混合分布 f_τ , 杂波协方差矩阵 R_0 以及确知信号的方向向量 s_ϕ 无关. 因此 MSDD-GLRT 的虚警概率只依赖于 j_0, J 和 N , 而与杂波无关, 即 MSDD-GLRT 检测器具有 CFAR 特性.

5 检测性能分析

本节对 MSDD-GLRT 进行检测性能分析, 并与 SDD-GLRT 和 NSDD-GLRT 方法进行了比较.

仿真中, 采用 Γ 分布来表示混合分布 f_τ :

$$f_\tau(\tau) = \frac{(L/b)^L}{\Gamma(L)} \tau^{L-1} e^{-(L/b)\tau}, \tau \geq 0 \quad (31)$$

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. 当 L 趋于无穷时, f_τ 近似为中心在 b 的脉冲函数; L 越小, f_τ 函数的拖尾越长, 杂波就会出现更多的尖峰. 不失一般性, 在仿真中令 $b = 1$, 即把杂波功率归一化为一个定值. 此时的距离单元中杂波分布函数等效为 K 分布^[14].

假设目标散射点所占距离单元实际个数为 j_0 , 仿真中估计目标散射点所占距离单元个数为 j_g , 所有 J 个距离单元都有杂波分量, 而只有 j_0 个距离单元有信号分量. J 个距离单元内目标平均功率为 σ_s^2 , 杂波平均功率为 σ_c^2 . 有目标散射点的距离单元回波可用方差 $\sigma^2 = \sigma_s^2 J / j_0$ 的 IID 的零均值复圆高斯随机变量建模. 有目标散射点的距离单元信杂比由 $(\sigma_s^2 J) / (\sigma_c^2 j_0)$ 给出, 其中 σ_s^2 / σ_c^2 是 J 个距离单元内的平均信杂比. 对于给定的距离单元, 如果目标散射点存在, 则目标散射点幅度在 N 个接收脉冲上假定为常数, 即目标不存在脉冲间起伏. 对于 MSDD-GLRT 检测器, 其检测概率 P_D 与 $s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \sigma_s^2 / \sigma_c^2$, 距离单元数目 J , 脉冲数 N , 虚警概率 P_F 及混合分布 f_τ 有关, 而 P_D 通过单个参数 $s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \sigma_s^2 / \sigma_c^2$ 与目标方向向量 s_ϕ 及杂波归一化协方差矩阵 R_0 相关联. $s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \sigma_s^2 / \sigma_c^2$ 是对 N 个脉冲回波进行权向量为 $R_0^{-1} s_\phi$ 的匹配滤波后的输出信杂比, 因此可以假设检测器的输入信杂比为 $S/C = s_\phi^H R_0^{-1} s_\phi \sigma_s^2 / \sigma_c^2$.

图 1 至图 6 给出了不同情况下 MSDD-GLRT 的检测性能曲线. 采用 Monte Carlo 方法计算相应的检测阈值和检测概率, 考虑到计算量的问题, 虚警概率设为 $P_F = 10^{-4}$, 估计每个检测阈值的 Monte Carlo 次数是 10^6 , 估计每一个 P_D 的 Monte Carlo 次数是 1000. 在估计目标散射点个数匹配情况下 ($j_0 = j_g = 3$), 图 1 给出了 $J = 50, L = 1, P_F = 10^{-4}$ 时, 脉冲数变化 ($N = 2, 4, 8, 16$) 对应的 MSDD-GLRT 检测性能曲线. 可以看出, 随着脉冲数 N 的增加, 检测性能得到改善, 并且检测性能的改善效果随着脉冲数的增加而减弱, 这与 NSDD-GLRT^[9] 相似. 在 $J = 50, L = 1, N = 2, P_F = 10^{-4}$ 情况下, 图 2 给出了估计目标散射点个数匹配情况下 ($j_0 = j_g$), 目标散射点所占距离单元个数变化 ($j_0 = 3, 4, 5, 10$) 对应的 MSDD-GLRT 检测性能曲线. 可以看出, 随着目标散射点所占距离单元个数的增加, MSDD-GLRT 检测统计量所积累的信号能量

增加, 检测性能得到明显提高. 由于 L 越小, 杂波尖峰分量越多, 图 3 在估计目标散射点个数匹配情况下 ($j_0 = j_g = 3$), 通过改变 L 的大小分析了杂波尖峰对检测性能的影响, 其中, $J = 50, N = 2, P_F = 10^{-4}, L = 1, 2, 10, 100$ 对应

4 条检测性能曲线. 可以看出, 在 $P_D > 0.5$ 时, 对于给定的 $P_D, L = 1$ 时所需的信杂比 S/C 比其他三种情况少 2dB 左右, 但 $L = 2, 10, 100$ 时的检测性能相差不大, 说明 MSDD-GLRT 对杂波尖峰的变化具有很好的鲁棒性.

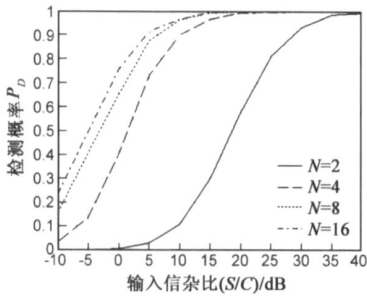


图1 $j_0=j_g=3, J=50, L=1, P_F=10^{-4}$, 不同脉冲数 ($N=2, 4, 8, 16$) 对应的检测性能曲线

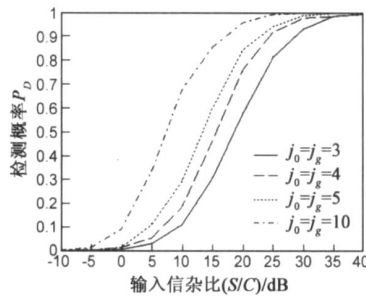


图2 $J=50, N=2, L=1, P_F=10^{-4}$, 不同目标散射点个数 ($j_0=j_g=3, 4, 5, 10$) 对应的检测性能曲线

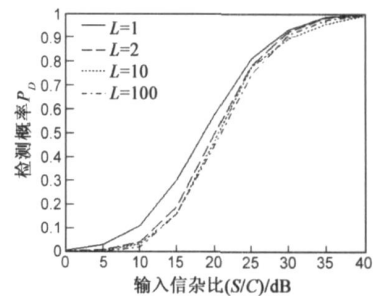


图3 $j_0=j_g=3, J=50, N=2, P_F=10^{-4}$, 不同杂波尖峰 ($L=1, 2, 10, 100$) 对应的检测性能曲线

接下来分析估计目标散射点个数失配情况下 MSDD-GLRT 的检测性能. 图 4 给出了在目标散射点所占距离单元实际个数 $j_0 = 3$ 条件下, 估计目标散射点个数分别为 $j_g = 3, 4, 5, 10$ 时 MSDD-GLRT 的检测性能, 并与 SDD-GLRT 和 NSDD-GLRT 的检测性能进行比较. 由图 4 可知, 在散射点稀疏条件下, MSDD-GLRT 的检测性能要明显好于 SDD-GLRT 和 NSDD-GLRT. 在不同情况下 ($j_g = 3, 4, 5, 10$), 对于给定的 $P_D \geq 0.5$, MSDD-GLRT 所需的信杂比 S/C 要比 SDD-GLRT 少 7dB 左右, 而比 NSDD-GLRT 少 14~17dB. 与 SDD-GLRT 类似, 在估计目标散射点个

数失配条件下, MSDD-GLRT 的检测性能有所降低, 但是当 $j_g = 4, 5$ 时, 其检测性能反而有微小的提高. 因此, 在估计目标散射点个数存在微弱偏差的情况下, MSDD-GLRT 具有很好的鲁棒性. 另外, 在估计目标散射点个数失配条件下 ($j_0 = 3, j_g = 10$), 图 5 和图 6 进一步分析了积累脉冲数 ($N = 2, 4, 8, 16$) 和杂波尖峰 ($L = 1, 2, 10, 100$) 的变化对 MSDD-GLRT 检测性能的影响. 从图中可以看出, 在失配情况下, 随着脉冲数的增加, MSDD-GLRT 的检测性能仍然有所提高, 而且检测器对杂波尖峰的变化仍具有较好的鲁棒性.

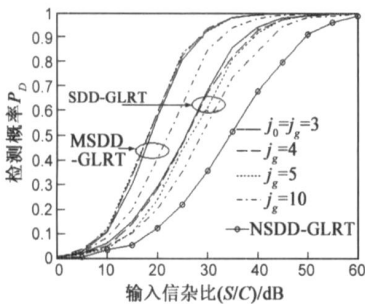


图4 $j_0=3, J=50, N=2, P_F=10^{-4}$, 不同目标散射点个数估计值 ($j_g=3, 4, 5, 10$) 对应的检测性能曲线

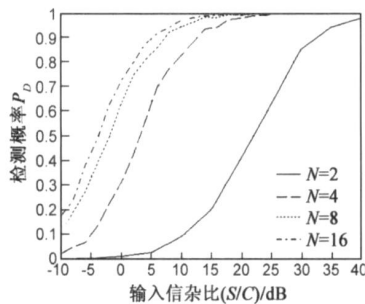


图5 $j_0=3, j_g=10, J=50, L=1, P_F=10^{-4}$, 不同脉冲数 ($N=2, 4, 8, 16$) 对应的检测性能曲线

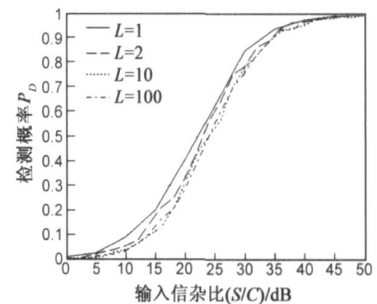


图6 $j_0=3, j_g=10, J=50, N=2, P_F=10^{-4}$, 不同杂波尖峰 ($L=1, 2, 10, 100$) 对应的检测性能曲线

6 结论

本文在 SIRV 非高斯杂波背景下, 对 SDD-GLRT 方法进行改进, 针对 SDD-GLRT 方法在统计平均意义下的最优检测所带来的检测损失, 通过充分利用目标散射点的先验信息, 基于有序统计检测的相关理论, 提出了 MSDD-GLRT 检测方法. 理论分析表明, 在 H_0 假设下, MSDD-GLRT 的虚警概率只依赖于 j_0, J 和 N , 而与混合分布 f_{τ} , 杂波归一化协方差矩阵 R_0 以及确知信号的方向向量 s_0 无关, 即 MSDD-GLRT 检测器具有 CFAR 特性.

实验结果表明, 随着脉冲数及目标散射点所占距离单元个数的增加, MSDD-GLRT 的检测性能得到提高. 在散射点分布稀疏条件下, MSDD-GLRT 的检测性能要明显好于 SDD-GLRT 和 NSDD-GLRT, 且在估计目标散射点个数存在微弱偏差和杂波尖峰变化的情况下, MSDD-GLRT 具有很好的鲁棒性. 下一步将重点研究 MSDD-GLRT 检测阈值与虚警概率的解析表达式的求解, 以及基于实测数据的检测器有效性验证.

参考文献:

[1] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理

- [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- He You, Guan Jian, Peng Ying ning, et al. Radar Automatic Detection and Constant False Alarm Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [2] E J Kelly. An adaptive detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(1): 115–127.
- [3] Karl Gerlach, M J Steiner. Adaptive detection of range distributed targets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(7): 1844– 1851.
- [4] P K Hughes II. A high resolution radar detection strategy[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(5): 663– 667.
- [5] Karl Gerlach, Michael Steiner, F C Lin. Detection of a spatially distributed target in white noise[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(7): 198– 200.
- [6] K Yao. A representation theorem and its applications to spherically invariant random processes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19(5): 600– 608.
- [7] Jian Tao, He You, Su Feng, et al. Performance characterization of two adaptive range spread target detectors for unwanted signal[A]. Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing[C]. Beijing: IEEE, 2008. 2326– 2329.
- [8] Barnard T J, Weiner D D. Non Gaussian clutter modeling with generalized spherically invariant random vectors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(10): 2384– 2390.
- [9] Karl Gerlach. Spatially distributed target detection in non Gaussian clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 926– 934.
- [10] I S Reed, J D Mallett, L E Brennan. Rapid convergence rate in adaptive arrays [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1974, 10(6): 853– 863.
- [11] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 205– 229.
- Zhang Xianda. Matrix Analysis and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 205– 229. (in Chinese)
- [12] James A Ritcey. Performance analysis of the censored mean level detector[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(4): 443– 454.

[13] A Papoulis, S U Pillai. Probability, Random Variables and Stochastic Processes (Fourth Edition) [M]. New York: McGraw-Hill, 2002.

[14] Farina A, Lombardo P. Modelling of a mixture of K distributed and Gaussian clutter for coherent radar detection[J]. Electronics Letters, 1994, 30(6): 520– 521.

作者简介:



简 涛 男, 1980 年出生于湖北天门, 现为海军航空工程学院博士研究生. 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研究.

E-mail: iamjiantao@yahoo.com.cn



何 友 男, 1956 年出生于吉林, 现为海军航空工程学院教授, 博士生导师. 主要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.



苏 峰 男, 1977 年出生于山东, 现为海军航空工程学院讲师. 主要研究方向为雷达微弱目标信号检测.



曲长文 男, 1963 年出生于山东, 现为海军航空工程学院教授. 主要研究方向为现代信号处理、电子对抗等.