

复合高斯杂波协方差矩阵估计的失配性能分析

简 涛¹,何 友¹,苏 峰¹,顾雪峰²,顾新锋¹

(1. 海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东烟台 264001; 2. 海军工程大学科研部, 湖北武汉 430033)

摘 要: 在球不变随机向量的复合高斯杂波满足局部均匀的背景下, 当估计的杂波分组大小与实际情况失配时, 分析了自适应归一化匹配滤波器 (ANMF) 的恒虚警率 (CFAR) 特性和检测性能. 理论分析表明, 当杂波实际分组大小是估计分组大小的整数倍时, ANMF 检测器对协方差矩阵结构和杂波功率水平均具有 CFAR 特性; 而在其它的情况下 ANMF 检测器只对协方差矩阵结构具有 CFAR 特性. 仿真结果还表明, 不同子集的选取对 ANMF 检测器的 CFAR 特性影响不大; 而在不同的失配条件下, ANMF 存在不同程度的检测损失, 且在纹理分量相关性信息完全未知时检测损失最大.

关键词: 自适应目标检测; 性能分析; 协方差矩阵估计; 恒虚警率; 复合高斯杂波

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0963-04

Mismatch Analysis of Covariance Matrix Estimator for Compound-Gaussian Clutter

JIAN Tao¹, HE You¹, SU Feng¹, GU Xue-feng², GU Xin-feng¹

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

2. Office of Research and Development, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: When the compound-Gaussian clutter can be clustered into groups of data with one and the same value of the texture, the Constant False Alarm Rate (CFAR) property and the detection performance of the adaptive normalized matched filter (ANMF) are analyzed in the mismatch situation, where the estimated clutter group size is unequal to the actual one. The theoretical analyses show that, the ANMF holds fully CFAR property when the actual clutter group size is multiples of the estimated one, while it is only CFAR to the clutter covariance matrix structure for other cases. It also shows that, the ANMF holds almost CFAR property for different subsets. Moreover, different mismatch cases cause different performance loss for the ANMF; and the worst performance results from the case when no a priori information about the texture correlation is available at all.

Key words: adaptive target detection; performance evaluation; covariance matrix estimate; constant false alarm rate; compound-Gaussian clutter

1 引言

在低分辨率雷达背景下, 基于中心极限定理, 杂波统计特性可以用高斯模型进行很好的模拟^[1]. 而随着雷达分辨率的进一步提高或在低掠地角条件下^[2], 背景杂波已不能再用高斯模型精确表示^[3,4], 但可以采用复合高斯模型. 在高分辨率情况下, 雷达会接收到类似于目标的尖峰, 这种含尖峰的复合高斯杂波可用球不变随机向量 (Spherically Invariant Random Vector, SIRV) 来建模^[5]. 在假设 SIRV 杂波的协方差矩阵结构已知的情况下, 文献^[6]得到了归一化匹配滤波器 (Normalized Matched Filter, NMF), 并指出利用不含目标的辅助数据可获得杂波协方差矩阵结构的估计, 最终能获得自适应检测器. 针对 SIRV 杂波协方差矩阵结构的估计问题, 文献^[7]将具有相同纹理分量的邻近距离单元分为一组, 得到了相应

的自适应 NMF (Adaptive NMF, ANMF), 获得了对杂波协方差矩阵结构和功率水平的恒虚警率 (CFAR) 特性.

在已知实际杂波分组大小情况下, ANMF 能获得较好的检测性能, 而实际环境中往往不能精确预知杂波分组的大小. 本文针对估计杂波分组的大小与实际大小失配的情况, 从理论上分析了 ANMF 的 CFAR 特性, 并探讨了 ANMF 在失配条件下的检测性能.

2 协方差矩阵估计问题

需解决的检测问题可由以下二元假设检验表达:

$$\begin{aligned} H_0: & \mathbf{z}_t = \mathbf{c}_t, \quad t = 0, \dots, R \\ H_1: & \begin{cases} \mathbf{z}_0 = \alpha \mathbf{p} + \mathbf{c}_0, \\ \mathbf{z}_t = \mathbf{c}_t, t = 1, \dots, R \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, 已知的单位导向矢量 $\mathbf{p} = (1, e^{j\varphi}, e^{2j\varphi}, \dots, e^{j(N-1)\varphi})^T / \sqrt{N}$ (其中相位参数 φ 为常数, “ $(\cdot)^T$ ”表示转

置); α 表示目标幅度. 假设辅助数据集 $\mathbf{z}_t, t = 1, \dots, R$ 不包含目标回波, 且具有与主数据同分布的 SIRV 杂波^[8]. 当 $R > N$ 时, 能确保由辅助数据获得的估计矩阵是非奇异的^[9].

杂波回波用 SIRV 分布来建模^[5], 则杂波向量 \mathbf{c}_t 可以表示成

$$\mathbf{c}_t = \sqrt{\tau_t} \cdot \boldsymbol{\eta}_t, t = 0, \dots, R \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{\eta}_t$ 和 τ_t 相互独立, 而 $\boldsymbol{\eta}_t = (\eta_t(1), \eta_t(2), \dots, \eta_t(N))^T$ 在不同距离单元之间相互独立; $\eta_t(n), n = 1, \dots, N$ 是零均值方差为 1 的复圆高斯随机变量. 实测数据表明^[10], 杂波散斑分量 $\boldsymbol{\eta}_t$ 的实部和虚部是相互独立的, 则 SIRV 杂波的协方差矩阵结构 $\boldsymbol{\Sigma}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{\Sigma} = \text{E}\{\boldsymbol{\eta}_t \boldsymbol{\eta}_t^H\} = 2\text{E}\{\boldsymbol{\eta}_t^{(1)} \boldsymbol{\eta}_t^{(1)T}\} = 2\text{E}\{\boldsymbol{\eta}_t^{(2)} \boldsymbol{\eta}_t^{(2)T}\} \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\Sigma}$ 为正定的 Hermitian 矩阵, “ $(\cdot)^H$ ” 表示共轭转置, $\mathbf{x}^{(1)}$ 和 $\mathbf{x}^{(2)}$ 分别表示向量 \mathbf{x} 的实部和虚部.

非负随机变量 τ_t 服从分布 f_t . 假设相邻距离单元的纹理分量 τ_t 可能完全相关, 可将 R 个辅助数据分成不同的组, 每组具有相同的 τ_t 值. 如果每组包含 R_S 个距离单元, 则有

$$\tau_t = T_{\lceil t/R_S \rceil}, t = 1, \dots, R \quad (4)$$

其中, $\lceil x \rceil$ 表示不小于 x 的最小整数, 总共分为 R_G 组, 最后一组的距离单元数为 $R_{S1} = R - R_S(R_G - 1)$.

令集合 $\mathcal{N} \equiv \{1, \dots, N\}$, 子集 $\mathcal{P} \subset \mathcal{N}$, 且相应的补集表示为 $\bar{\mathcal{P}}$, 集合 \mathcal{P} 的势为 P . 对于 N 维向量 \mathbf{x} 来说, 删除 \mathbf{x} 的第 $\forall i \in \mathcal{P}$ 个元素后, 由剩下的元素组成的向量表示为 $\mathbf{x}_{\bar{\mathcal{P}}}$. 而对于 $N \times N$ 的矩阵 \mathbf{A} 来说, 删除 \mathbf{A} 的第 $\forall i \in \mathcal{P}$ 行和第 i 列后, 由剩下的元素组成的矩阵表示为 $\mathbf{A}_{\bar{\mathcal{P}}}$.

基于杂波分组的协方差矩阵结构估计为^[7]

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{(11)} = \frac{1}{R_G} \sum_{t_c=1}^{R_G} \frac{\sum_{t=(t_c-1)R_S+1}^{\min(t_c R_S, R)} \mathbf{z}_t^{(1)} \mathbf{z}_t^{(1)T}}{\left[\det \left(\sum_{t=(t_c-1)R_S+1}^{\min(t_c R_S, R)} \mathbf{z}_t^{(2)} \mathbf{z}_t^{(2)T} \right)_{\bar{\mathcal{P}}} \right]}^{\frac{1}{P}} \quad (5)$$

其中, $\det(\cdot)$ 表示方阵的行列式. 对于任意的 $\mathcal{P} \subset \mathcal{N}$, 如果满足 $P \leq \min(R_S, R_{S1})$, 则 $P \times P$ 矩阵 $\left(\sum_{t=(t_c-1)R_S+1}^{\min(t_c R_S, R)} \mathbf{z}_t^{(2)} \mathbf{z}_t^{(2)T} \right)_{\bar{\mathcal{P}}}$ 的行列式以概率 1 为正^[11]. 而当 $R > N$ 时, 估计矩阵 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{(11)}$ 以概率 1 为正定.

文献[6]在已知 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的条件下, 获得了 NMF 检测器. 利用协方差矩阵结构估计 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{(11)}$ 代替 $\boldsymbol{\Sigma}$, 获得的 ANMF 可以表示为^[6]

$$\lambda_{\text{ANMF}} = \frac{|\mathbf{p}^H \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1} \mathbf{z}_0|^2}{(\mathbf{p}^H \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1} \mathbf{p})(\mathbf{z}_0^H \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1} \mathbf{z}_0)} \quad (6)$$

3 估计失配时 ANMF 的 CFAR 特性

本节主要分析杂波分组大小失配时 ANMF 的 CFAR 特性. 由式(6)可知, 由于被检测单元观测值 \mathbf{z}_0 的纹理分量 τ_0 在分子和分母之间约去, 因此, ANMF 对被检测

单元的杂波功率水平具有 CFAR 特性. 但是由于 ANMF 中的杂波协方差矩阵结构为估计值, 需要分析 ANMF 对实际杂波协方差矩阵结构的 CFAR 特性.

假设 R_{Sest} 表示估计的杂波分组大小, R_{Gest} 表示估计的杂波分组数, 则杂波分组大小未知时, 协方差矩阵结构的估计表示为

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\text{est}}^{(11)} = \frac{1}{R_{\text{Gest}}} \sum_{t_c=1}^{R_{\text{Gest}}} \frac{\sum_{t=(t_c-1)R_{\text{Sest}}+1}^{\min(t_c R_{\text{Sest}}, R)} \mathbf{z}_t^{(1)} \mathbf{z}_t^{(1)T}}{\left[\det \left(\sum_{t=(t_c-1)R_{\text{Sest}}+1}^{\min(t_c R_{\text{Sest}}, R)} \mathbf{z}_t^{(2)} \mathbf{z}_t^{(2)T} \right) \right]}^{\frac{1}{P}} \quad (7)$$

为了便于分析, 给出定理 1^[7]: 如果非奇异的估计矩阵 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$ 满足

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \hat{\boldsymbol{\Sigma}} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} = f_1 \mathbf{U}^H \boldsymbol{\Sigma}_0 \mathbf{U} \quad (8)$$

且 $\boldsymbol{\Sigma}_0$ 独立于 $\boldsymbol{\Sigma}$, 则式(6)的 ANMF 对 $\boldsymbol{\Sigma}$ 是 CFAR 的. 式中, 白化矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2}$ 满足 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2}$; \mathbf{U} 表示能将向量 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \mathbf{p}$ 转向 N 维向量 $\mathbf{e}_1 = (1, 0, \dots, 0)^T$ 的酉矩阵; f_1 表示某标量.

如果要说明基于 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\text{est}}^{(11)}$ 的 ANMF 对 $\boldsymbol{\Sigma}$ 是 CFAR 的, 只需证明式(7)的 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\text{est}}^{(11)}$ 满足定理 1. 对辅助数据的实部分量 $\mathbf{z}_t^{(1)} = \sqrt{\tau_t} \cdot \boldsymbol{\eta}_t^{(1)}$ 进行白化旋转可得

$$\bar{\mathbf{z}}_t^{(1)} = \sqrt{\tau_t} \cdot \bar{\boldsymbol{\eta}}_t^{(1)}, t = 1, \dots, R \quad (9)$$

其中, $\bar{\boldsymbol{\eta}}_t^{(1)} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \boldsymbol{\eta}_t^{(1)}$ 为白化旋转后的高斯分量, 其协方差矩阵为 $\mathbf{I}_N/2$, 即 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_t^{(1)}$ 与 $\boldsymbol{\Sigma}$ 无关.

进一步利用 $\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathcal{P}}}^{-1/2}$ 对 $\mathbf{z}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)} = \sqrt{\tau_t} \boldsymbol{\eta}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)}$ 进行白化可得

$$\bar{\mathbf{z}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)} = \sqrt{\tau_t} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)}, t = 1, \dots, R \quad (10)$$

其中, $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)} = \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathcal{P}}}^{-1/2} \boldsymbol{\eta}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)}$ 为白化后的高斯分量, 其协方差矩阵为 $\mathbf{I}_{N/2}$, 即 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)}$ 与 $\boldsymbol{\Sigma}$ 无关. 则式(7)中的行列式可以表示为

$$\det \left(\sum_{t=(t_c-1)R_{\text{Sest}}+1}^{\min(t_c R_{\text{Sest}}, R)} \mathbf{z}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)} \mathbf{z}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)T} \right) = \det(\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathcal{P}}}) \det \left(\sum_{t=(t_c-1)R_{\text{Sest}}+1}^{\min(t_c R_{\text{Sest}}, R)} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)T} \right) \quad (11)$$

由式(9)和(11)可知

$$\begin{aligned} & \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\text{est}}^{(11)} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \mathbf{U}^H \\ &= \frac{1}{[\det(\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{\mathcal{P}}})]^{\frac{1}{P}} R_{\text{Gest}}} \sum_{t_c=1}^{R_{\text{Gest}}} \frac{\sum_{t=(t_c-1)R_{\text{Sest}}+1}^{\min(t_c R_{\text{Sest}}, R)} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(1)} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(1)T}}{\left[\det \left(\sum_{t=(t_c-1)R_{\text{Sest}}+1}^{\min(t_c R_{\text{Sest}}, R)} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)} \bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)T} \right) \right]}^{\frac{1}{P}} \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可知, 由于 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_t^{(1)}$ 和 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{t\bar{\mathcal{P}}}^{(2)}$ 均与 $\boldsymbol{\Sigma}$ 无关, 因此满足定理 1 的条件, 基于 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\text{est}}^{(11)}$ 的 ANMF 对 $\boldsymbol{\Sigma}$ 是 CFAR 的. 需要说明的是, 以上分析是在未知实际杂波分组大小情况下进行的, 因此结论同样适合于杂波分组大小失配的情况, 这将在接下来的性能分析中进行验证.

要使 ANMF 对杂波功率水平和协方差矩阵结构均具有 CFAR 特性, 还需要 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\text{est}}^{(11)}$ 与辅助数据的纹理分量

$\tau_i, i=1, \dots, R$ 无关. 由式(12)可知, 在满足 $R_S = nR_{Sest}$ (其中 n 为某正整数) 时, 估计的分组内杂波观测值仍具有相同纹理分量, 式(7)中求和项内同组的 $z_i^{(1)}$ 和 $z_i^{(2)}$ 包含的纹理分量值 τ_i 可在分子和分母之间约去, 即 $\hat{\Sigma}_{est}^{(1)}$ 与辅助数据的纹理分量 $\tau_i, i=1, \dots, R$ 无关. 因此, 在满足 $R_S = nR_{Sest}$ 的条件时, 基于 $\hat{\Sigma}_{est}^{(1)}$ 的 ANMF 对杂波功率水平和协方差矩阵结构均具有 CFAR 特性; 而当 $R_S \neq mR_{Sest}$ (其中 m 为任意正整数) 时, 由于不能满足所有分组内杂波观测值具有相同纹理分量的条件, 基于 $\hat{\Sigma}_{est}^{(1)}$ 的 ANMF 只对 Σ 具有 CFAR 特性, 这一点将在接下来的性能分析中进行详细的讨论.

4 性能分析

实际环境中往往不能预知杂波分组的大小, 本节将通过仿真分析 R_{Sest} 与 R_S 失配对 ANMF 的 CFAR 特性和检测性能的影响. 杂波协方差矩阵结构用指数相关结构建模, 其第 i 行第 j 列的元素可以表示为:

$$[\Sigma]_{i,j} = \gamma^{|i-j|}, 1 \leq i, j \leq N \quad (13)$$

其中, γ 表示杂波的一阶相关系数.

纹理分量的分布采用

$$f_{\tau}(x) = \frac{(L/b)^L}{\Gamma(L)} x^{L-1} e^{-(L/b)x}, x \geq 0 \quad (14)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数; b 是均值 (不失一般性, 令 $b=1$); L 用来控制杂波尖峰程度. 采用 Monte Carlo 方法进行仿真分析.

首先, 在匹配情况下 ($R_{Sest} = R_S$), 分析不同子集 \mathcal{P} 对 ANMF 的 CFAR 特性的影响. 不失一般性, 假设子集 $\mathcal{P} = \{1, \dots, P\}$. 图 1 中给出了 $P=1, 2, 3, 4$ 对应的检测阈值与虚警概率的关系曲线. 可以看出, 不同 P 值对应的曲线几乎重叠, 说明子集 \mathcal{P} 对 CFAR 特性影响不大. 不失一般性, 下文均采用 $P=1$.

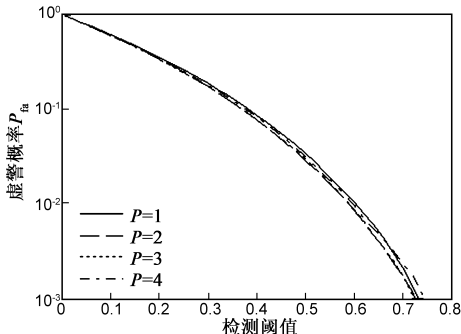


图1 $R=32, R_S=R_{Sest}=4, N=8, L=0.5, \gamma=0, P=1, 2, 3, 4$ 时检测阈值与虚警概率的关系曲线

接着, 从不同的杂波功率水平起伏 (即不同的 L) 和不同的协方差矩阵结构 (即不同的 γ) 两个方面, 分析 R_{Sest} 与 R_S 失配对 ANMF 的 CFAR 特性的影响. 图 2 给出了 $R_{Sest}=1, 2$ 时检测阈值与虚警概率的关系曲线. 从图中可以看出, 不同杂波功率水平和协方差矩阵结构所

对应的曲线完全重合, 即 $R_{Sest}=1$ 或 2 时, ANMF 检测器对杂波环境具有完全 CFAR 特性. 进一步, 图 3 给出了 $R_{Sest}=3, 5$ 时检测阈值与虚警概率的关系曲线. 可以看出, 当 $R_{Sest}=3$ 或 5 时, ANMF 对协方差矩阵结构仍具有 CFAR 特性, 但对杂波功率水平不再具有 CFAR 特性, 这在 $R_{Sest}=5$ 时表现得尤为明显. 如前一节的理论分析表明的那样, 当 $R_{Sest}=3$ 时, 由于 $R_{Sest} < R_S$, 部分组内杂波仍可能具有相同的纹理分量值, 而当 $R_{Sest}=5$ 时, 由于 $R_{Sest} > R_S$, 所有组内杂波都不可能具有相同的纹理分量值, 从而导致协方差矩阵的估计误差更大.

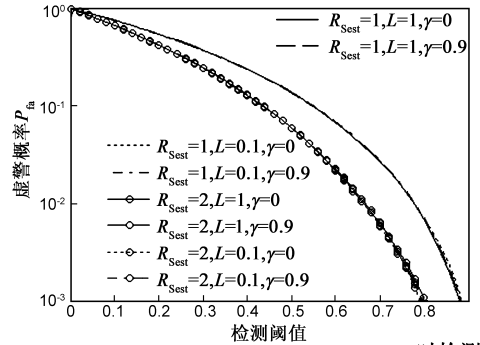


图2 $R=32, R_S=4, R_{Sest}=1, 2, N=8, L=0.1, \gamma=0, 0.9, P=1$ 时检测阈值与虚警概率的关系曲线

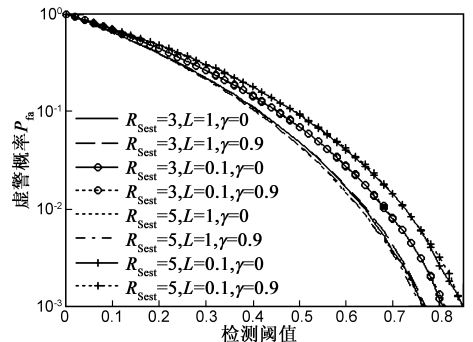


图3 $R=32, R_S=4, R_{Sest}=3, 5, N=8, L=0.1, \gamma=0, 0.9, P=1$ 时检测阈值与虚警概率的关系曲线

综合图 2 和图 3 的分析可知, 当杂波实际分组大小是估计的分组大小整数倍时 (例如 $R_S = 4R_{Sest}$ 或 $R_S = 2R_{Sest}$), ANMF 是完全 CFAR 的, 因为此时同组的杂波向量仍具有相同的纹理分量; 但是在其它情况下 ($R_S \neq mR_{Sest}$, m 为任意的正整数), ANMF 只对协方差矩阵结构具有 CFAR 特性, 因为此时同组的杂波向量具有不同的纹理分量, 协方差矩阵估计受辅助数据杂波功率水平的影响. 这也证实了前一节理论分析结果的正确性.

最后分析 ANMF 的检测性能. 图 4 给出了 $R_{Sest}=1, \dots, 8$ 对应的检测性能曲线. 从图中可以看出, 在估计杂波分组的大小失配情况下, ANMF 存在不同程度的检测损失, 其中 $R_{Sest}=1$ 时的检测损失最大, 与匹配情况 ($R_S = R_{Sest} = 4$) 相比, 在给定的检测概率情况下, $R_{Sest}=1$ 的检测损失仍在 5dB 之内. 虽然 $R_{Sest}=1$ 表示不知道任何

有关纹理分量相关性的信息,但此时的 ANMF 仍是完全自适应的.失配情况下, $R_{\text{Sest}} = 8$ 时的检测损失最小,但此时的 ANMF 对于杂波纹理分量不是自适应的.另外,由于协方差矩阵估计误差的影响,与理想的 NMF 相比, ANMF 存在一定的性能损失.图 5 分析了杂波尖峰起伏和协方差矩阵结构对 ANMF 检测性能的影响.可以看出, ANMF 对不同的杂波相关性具有很好的鲁棒性;杂波尖峰的增加 (L 的减小) 在 $P_d < 0.8$ 时会改善 ANMF 检测性能,而在 $P_d > 0.8$ 时反而会降低检测性能.

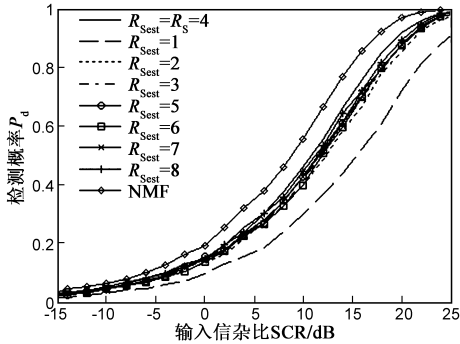


图4 $P_{\text{fa}} = 10^{-4}, R = 32, R_s = 4, R_{\text{Sest}} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, N = 8, L = 0.5, \gamma = 0, P = 1$ 时的检测性能曲线

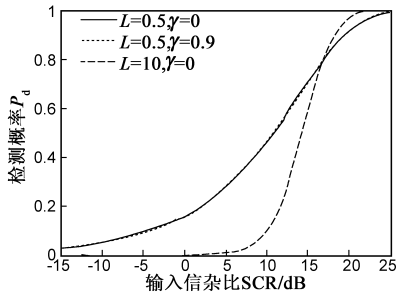


图5 $P_{\text{fa}} = 10^{-4}, R = 32, R_s = R_{\text{Sest}} = 4, N = 8, L = 0.5, 10, \gamma = 0, 0.9, P = 1$ 时的检测性能曲线

5 小结

在 SIRV 复合高斯杂波满足局部均匀的背景下,分析了估计的杂波分组大小与实际情况失配对 ANMF 的 CFAR 特性和检测性能的影响.理论分析表明,当杂波实际分组大小是估计分组大小的整数倍时,所得的 ANMF 对杂波协方差矩阵结构和功率水平均具有 CFAR 特性,而在其它情况下 ANMF 只对协方差矩阵结构具有 CFAR 特性,仿真分析进一步验证了这一结论.利用实际数据进行性能分析是下一步将要研究的问题.

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] 顾新锋, 等. 一种基于波形的距离扩展目标检测方法 [J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(6): 659 - 661, 668.
GU Xin-feng, et al. A detector based on waveform for range-spread targets [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2008, 23(6): 659 - 661, 668. (in Chinese)

[3] 刘向阳, 等. 极不均匀合成孔径雷达杂波建模及恒虚警检测 [J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1617 - 1621.
LIU Xiang-yang, et al. Model validation of the extremely heterogeneous SAR clutter and its CFAR detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1617 - 1621. (in Chinese)

[4] 杨建宇, 李俊生. 高分辨率雷达目标的随机参量脉冲串检测方法 [J]. 电子学报, 2004, 32(6): 1044 - 1046.
YANG Jian-yu, LI Jun-sheng. Random parameters pulse train detector for high range resolution radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 1044 - 1046. (in Chinese)

[5] 简涛, 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, 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)

[6] Conte E, Lops M, Ricci G. Asymptotically optimum radar detection in compound-Gaussian clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(2): 617 - 625.

[7] Conte E, De Maio A, Ricci G. Covariance matrix estimation for adaptive CFAR detection in compound-Gaussian clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 415 - 426.

[8] Kelly E J. An adaptive detection algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(1): 115 - 127.

[9] Haykin S, Steinhardt A. Adaptive Radar Detection and Estimation [M]. New York: Wiley, 1992.

[10] Billingsley J B, Farina A, Gini F, et al. Statistical analyses of measured radar ground clutter data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2): 579 - 593.

[11] Mardia K V, Kent J T, Bibby J M. Multivariate Analysis [M]. New York: Academic Press, 1979.

作者简介



简涛 男, 1980 年 8 月出生, 湖北天门人. 硕士, 讲师. 主要研究方向: 雷达信号检测与信号处理.

E-mail: iamjiantao@yahoo.com.cn

何友 男, 1956 年 10 月出生, 吉林磐石人. 教授, 博导. 主要研究方向: 雷达信号检测和处理、多传感器信息融合等.

