

杂波协方差矩阵结构的融合估计方法

王智, 简涛[†], 何友

(海军航空大学 信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对特定杂波背景下的最优或次优杂波协方差矩阵估计方法难以适应过渡杂波环境的问题, 提出协方差矩阵结构的融合估计方法, 通过调整参数涵盖现有的3种杂波协方差矩阵估计方法, 并分析所提出方法对应的自适应归一化匹配滤波器的自适应特性. 其次, 确定了控制参数的经验公式, 经验公式符合数值结果. 最后, 从估计精度、恒虚警率特性和检测性能3个方面对所提出方法和已有方法进行对比分析. 仿真结果表明, 在过渡杂波环境中, 所提出方法的精度更高、检测效果更好, 对实际杂波非高斯程度时空渐变性具有较强的适应能力.

关键词: 协方差矩阵估计; 自适应归一化匹配滤波器; 球不变随机向量; 归一化均方误差; 约束归一化F范数; 恒虚警率

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

A fusion estimation method for covariance matrix structure of clutter

WANG Zhi, JIAN Tao[†], HE You

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: This paper addresses the problem that the optimal or suboptimal clutter covariance matrix estimation method in the specific clutter background is difficult to adapt to the transitional clutter environment. Firstly, a fusion estimation method for the matrix covariance matrix structure, which covers three existing clutter covariance matrix estimation methods by adjusting the parameter, is proposed, and the adaptive characteristics of the adaptive normalized matched filter corresponding to the proposed method are analyzed and verified by simulation experiments. Then, the empirical formula of the parameter is determined, and it conforms to the numerical results. Finally, the proposed method and the existing methods are compared and analyzed from the aspects of estimation accuracy, constant false alarm rate and detection performance. The results show that the proposed method, which has strong ability to adapt to the temporal and spatial gradients of the clutter, has higher accuracy and better detection performance in the transitional clutter environment.

Keywords: covariance matrix estimation; adaptive normalized matched filter; spherically invariant random vector; normalized mean square error; constrained normalized Frobenius norm; constant false alarm rate

0 引言

在雷达目标自适应检测中, 考虑到海杂波协方差矩阵常常是未知的, 一般利用与检测单元相邻、不含目标的辅助单元数据来估计真实海杂波的协方差矩阵. 研究表明, 海杂波统计特性受海态、风速、掠地角、雷达分辨率等各种因素的影响^[1]. 在低分辨率条件或当掠地角较大时, 可以用高斯分布表征杂波的特性; 当雷达分辨率增大或掠地角逐渐减小时, 杂波会表现出较强的非均匀、非高斯特性^[2], 此时可用复合高斯分布^[3]进行建模.

针对高斯和复合高斯杂波背景下的目标自适应

检测问题, 存在最优或次优的杂波协方差矩阵估计方法. 经典的采样协方差矩阵 (Sample covariance matrix, SCM) 是高斯杂波中的最大似然估计 (Maximum likelihood estimate, MLE)^[4], 而基于辅助数据的复合高斯杂波协方差矩阵结构的 MLE 没有闭型表达式, 且涉及到超越方程的求解, 现有归一化采样协方差矩阵 (Normalized sample covariance matrix, NSCM)^[5]、近似最大似然估计 (Approximated maximum likelihood, AML)^[6] 矩阵等均为次优估计方法. 自适应检测方法高度依赖于杂波向量的协方差矩阵, 当杂波环境与选取的协方差估计方法适用的环

收稿日期: 2018-01-10; 修回日期: 2018-06-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61471379, 61790551, 61102166); 国防科技基金项目 (2012028); 装备发展部“十三五”预研项目 (41413060101); 泰山学者工程专项经费项目.

责任编辑: 李忠奎.

[†]通讯作者. E-mail: work_jt@163.com.

境不匹配时,就会导致检测器的检测性能和恒虚警率(Constant false alarm rate, CFAR)^[7]特性恶化. 由于现有的协方差矩阵估计方法只考虑了高斯或复合高斯的单种特定情况,实际杂波的非高斯特性往往在时间和空间上随环境的改变而渐近变化,上述特定杂波背景下的最优或次优杂波协方差矩阵估计方法难以适应过渡杂波环境的特点.

针对海杂波非高斯程度的时空渐变性,本文提出协方差矩阵结构融合估计器 $\hat{\Sigma}_\alpha$,通过调整参数 α 和迭代次数涵盖现有的SCM、NSCM以及AML估计方法. 选用自适应归一化匹配滤波器(Adaptive normalized matched filter, ANMF)^[8]作为检测框架,在不同的杂波环境下与SCM、NSCM和AML估计方法进行对比分析. 仿真结果证实了所提出协方差矩阵估计方法的有效性.

1 问题描述

雷达目标检测问题可以由以下二元假设检验来表达:

$$\begin{aligned} H_0: & \mathbf{z}_t = \mathbf{c}_t, \quad t = 0, 1, \dots, R; \\ H_1: & \begin{cases} \mathbf{z}_0 = a_0 \mathbf{p} + \mathbf{c}_0, \\ \mathbf{z}_t = \mathbf{c}_t, \quad t = 1, 2, \dots, R. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: N 维复向量 \mathbf{z}_t 和 \mathbf{c}_t 分别表示距离单元 t 的观测向量和杂波向量, N 表示相干脉冲链的脉冲数; $t = 0$ 表示被检测距离单元, 而 $t = 1, 2, \dots, R$ 表示 R 个辅助距离单元; a_0 为目标回波幅度; \mathbf{p} 为单位导向矢量. 假设不同距离单元之间的观测向量相互独立, 且 $R > N$, 以确保由辅助数据获得的协方差矩阵估计是非奇异的^[9].

采用球不变随机向量(Spherically invariant random vector, SIRV)^[2]对杂波向量 \mathbf{c}_t 进行建模,即

$$\mathbf{c}_t = \sqrt{\tau_t} \boldsymbol{\eta}_t, \quad t = 0, 1, \dots, R. \quad (2)$$

其中: τ_t 是一个具有有限均方值的非负随机变量; $\boldsymbol{\eta}_t$ 为散斑分量, 是均值为0、方差为1的 N 维复高斯向量; $\mathbf{M} = \text{E}[\mathbf{c}_t \mathbf{c}_t^H]$ 称为杂波的协方差矩阵, $\boldsymbol{\Sigma} = \text{E}[\boldsymbol{\eta}_t \boldsymbol{\eta}_t^H]$ 称为杂波的协方差矩阵结构, 且满足

$$\boldsymbol{\Sigma} = \frac{\mathbf{M}}{\sigma^2}, \quad (3)$$

σ^2 为杂波功率.

ANMF的检测统计量可表示为^[8]

$$\xi_{\text{ANMF}} = \frac{|\mathbf{p}^H \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1} \mathbf{z}_0|^2}{(\mathbf{p}^H \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1} \mathbf{p})(\mathbf{z}_0^H \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1} \mathbf{z}_0)}, \quad (4)$$

其中 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$ 表示杂波协方差矩阵结构 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的估计值.

如何设计合适的杂波协方差矩阵估计方法, 充分考虑过渡杂波环境的特点, 使自适应检测器结构和相应的杂波协方差矩阵估计方法相匹配, 是接下来需要解决的问题.

2 协方差矩阵的融合估计

2.1 结构设计

未知协方差矩阵的融合估计值 $\hat{\Sigma}_\alpha = \hat{\Sigma}_\alpha^{(K)}$, 其中 $\hat{\Sigma}_\alpha^{(K)}$ 通过如下的迭代过程实现:

$$\hat{\Sigma}_\alpha^{(k+1)} = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^R \frac{\mathbf{z}_t \mathbf{z}_t^H}{[\mathbf{z}_t^H (N \hat{\Sigma}_\alpha^{(k)})^{-1} \mathbf{z}_t]^\alpha}. \quad (5)$$

其中: $k = 0, 1, \dots, K-1$, K 表示最终的迭代次数; $\hat{\Sigma}_\alpha^{(k)}$ 表示给定控制参数 α 时的第 k 次迭代估计矩阵. 为增强估计过程的普适性, 式(5)的初始化矩阵 $\hat{\Sigma}_\alpha^{(0)}$ 采用单位阵, 而最终的迭代结果为未知协方差矩阵的融合估计值 $\hat{\Sigma}_\alpha = \hat{\Sigma}_\alpha^{(K)}$; 参数 α 满足 $0 \leq \alpha \leq 1$, 且根据实际杂波的非高斯程度设定, 杂波的非高斯程度越大, α 的取值越大.

当 $\alpha = 0$ 时, 根据式(5)计算的未知协方差矩阵的融合估计值为

$$\hat{\Sigma}_\alpha = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^R \mathbf{z}_t \mathbf{z}_t^H. \quad (6)$$

此时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 恰好为SCM, 说明SCM为融合估计器 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 在 $\alpha = 0$ 时的特例; 而当 $\alpha = 1$ 时, 式(5)表示的迭代过程简化为

$$\hat{\Sigma}_\alpha^{(k+1)} = \frac{N}{R} \sum_{t=1}^R \frac{\boldsymbol{\eta}_t \boldsymbol{\eta}_t^H}{\boldsymbol{\eta}_t^H (\hat{\Sigma}_\alpha^{(k)})^{-1} \boldsymbol{\eta}_t}. \quad (7)$$

此时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 的迭代过程与AML的迭代过程完全一致, 说明AML为融合估计器 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 在 $\alpha = 1$ 时的特例. 特别地, 当 $\alpha = 1$ 且 $K = 1$ 时, 根据式(5)计算的未知协方差矩阵的融合估计值为

$$\hat{\Sigma}_\alpha = \hat{\Sigma}_\alpha^{(1)} = \frac{N}{R} \sum_{t=1}^R \frac{\boldsymbol{\eta}_t \boldsymbol{\eta}_t^H}{\boldsymbol{\eta}_t^H \boldsymbol{\eta}_t}. \quad (8)$$

此时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 恰好为NSCM, 说明NSCM为融合估计器 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 在 $\alpha = 1$ 且 $K = 1$ 时的特例.

对于非高斯杂波环境, 当 $K \geq 3$ 时, AML能获得较好的估计精度^[6]. 综合考虑算法运算量和检测器设计对协方差矩阵估计精度的要求, 取 $K = 3$ 的迭代结果作为未知协方差矩阵的融合估计值.

2.2 自适应特性分析

为了分析 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 的迭代估计矩阵对应的ANMF(下文称为 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF)的CFAR特性, 可以采用以下定理^[10].

定理1 如果协方差矩阵结构估计 $\hat{\Sigma}$ 满足

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \hat{\Sigma} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} = f_1 \mathbf{U}^H \boldsymbol{\Sigma}_0 \mathbf{U}, \quad (9)$$

且 $\boldsymbol{\Sigma}_0$ 与协方差矩阵结构 $\boldsymbol{\Sigma}$ 相互独立, 则表明式(5)的ANMF对 $\boldsymbol{\Sigma}$ 具有CFAR特性. 其中, 矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2}$ 满足 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2}$, \mathbf{U} 为将向量 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \mathbf{p}$ 转向 N 维向量 $\mathbf{e}_1 = [1, 0, \dots, 0]^T$ 的酉矩阵, f_1 为标量函数.

利用白化矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1/2}$ 对辅助数据 $\mathbf{z}_t = \sqrt{\tau_t} \boldsymbol{\eta}_t$ 进行白化, 并进一步用酉矩阵 \mathbf{U} 对白化后的向量进行

旋转,可得

$$\bar{z}_t = \sqrt{\tau_t} \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \boldsymbol{\eta}_t = \sqrt{\tau_t} \bar{\boldsymbol{\eta}}_t, \quad (10)$$

其中 $\bar{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \boldsymbol{\eta}_t$ 为旋转后的白化高斯分量,其协方差矩阵为单位阵 \mathbf{I}_N .

在极端情况下,当 $\alpha = 0$ 时, $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ 为一个常数;当 $\alpha = 1$ 时,文献[11]已证明迭代过程(7)的收敛解是存在且唯一的. 令

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^R \frac{\mathbf{z}_t \mathbf{z}_t^H}{[\mathbf{z}_t^H (\mathbf{N} \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha)^{-1} \mathbf{z}_t]^\alpha} = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^R \tau_t^{1-\alpha} \frac{\boldsymbol{\eta}_t \boldsymbol{\eta}_t^H}{[\boldsymbol{\eta}_t^H (\mathbf{N} \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha)^{-1} \boldsymbol{\eta}_t]^\alpha}, \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_\alpha = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha \boldsymbol{\Sigma}^{-1/2} \mathbf{U}^H, \quad (12)$$

则有

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha = \boldsymbol{\Sigma}^{1/2} \mathbf{U}^H \boldsymbol{\Sigma}_\alpha \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma}^{1/2}. \quad (13)$$

将式(13)代入(11),化简可得

$$\boldsymbol{\Sigma}_\alpha = \frac{1}{R} \sum_{t=1}^R \tau_t^{1-\alpha} \frac{\bar{\boldsymbol{\eta}}_t \bar{\boldsymbol{\eta}}_t^H}{[\bar{\boldsymbol{\eta}}_t^H (\mathbf{N} \boldsymbol{\Sigma}_\alpha)^{-1} \bar{\boldsymbol{\eta}}_t]^\alpha}. \quad (14)$$

由式(11)知 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ 是协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的迭代估计唯一解;由于 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_t$ 的协方差矩阵为单位阵 \mathbf{I}_N ,对比式(11)和(14),结合迭代估计解存在的唯一性可知, $\boldsymbol{\Sigma}_\alpha$ 是单位阵 \mathbf{I}_N 的迭代估计唯一解^[7]. $\bar{\boldsymbol{\eta}}_t$ 的统计特性与 $\boldsymbol{\Sigma}$ 无关,因此关于矩阵 \mathbf{I}_N 的迭代解 $\boldsymbol{\Sigma}_\alpha$ 与 $\boldsymbol{\Sigma}$ 无关. 由式(12)可知,式(5)的收敛解 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ 满足该定理,即迭代估计唯一解对应ANMF对矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 具有CFAR特性.

3 控制参数的选取

本节通过评定 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ -ANMF检测器的检测性能来选取协方差矩阵估计器的控制参数 α . 在给定虚警概率条件下,通常用信杂比SCR随检测概率 P_d 变化的曲线,即ROC(Receiver operating characteristic)曲线来评定检测器的检测性能,并且ROC曲线下的面积越大,检测器性能越好. 当检测概率低于0.5时,对于大多数雷达而言不足以形成一个稳定的目标轨迹,故本文选取ROC曲线以下且 $P_d \geq 0.5$ 的面积来评定 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ -ANMF的检测性能^[12]. 设 $P_d(\alpha, \text{SCR})$ 为给定虚警概率下 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ -ANMF的检测概率,则积分区域定义为

$$\Phi(\alpha) = \int_{\text{SCR}_1}^{\text{SCR}_2} P_d(\alpha, \text{SCR}) d(\text{SCR}), \quad (15)$$

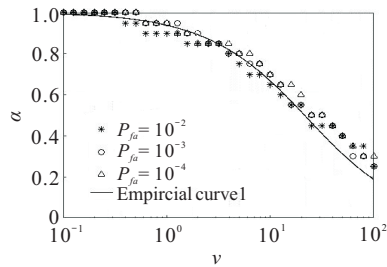
$$\text{SCR} = 10 \lg \left(\frac{|a_0|^2 \mathbf{p}^H \boldsymbol{\Sigma}_\alpha^{-1} \mathbf{p}}{N} \right). \quad (16)$$

由于 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_\alpha$ -ANMF在复合高斯背景下的检测概率 P_d 不能通过简单的表达式表示,本文通过数值计算寻求控制参数 α 的经验公式. 仿真中,SCR取 $[-10 \text{ dB}, 20 \text{ dB}]$ ^[12],纹理分量的Gamma分布模型^[9]为

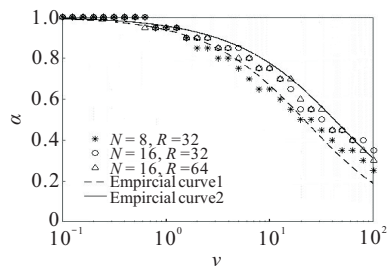
$$f(\tau|v, \sigma) = \frac{(v/\sigma)^v}{\Gamma(v)} \tau^{v-1} e^{-(v/\sigma)\tau}, \tau \geq 0. \quad (17)$$

其中: $\Gamma(\cdot)$ 是Gamma函数; v 是形状参数, v 越小,杂波出现的尖峰越多. 当 $\sigma = 1$ 时,距离单元中杂波的分

布等效为 K 分布. K 分布与海杂波形成机理相吻合且具有很好的拟合效果,在海杂波建模中获得广泛应用^[1],因此后文均采用 K 分布模型进行分析. 仿真结果如图1所示.



(a) $N=8, R=16$



(b) $P_{fa} = 10^{-3}$

图1 参数 α 的经验曲线

由图1可以得出如下结论:

- 1) 当形状参数 v 从0变化至无穷大时,参数 α 逐渐由1减小至0,即 v 与 α 成反比关系;
- 2) 其他条件相同的情况下,辅助数据数量 R 和虚警概率 P_{fa} 的改变对参数 α 影响不大;
- 3) N 越大,随着 v 的增加,参数 α 减小越慢.

根据以上结论,本文拟合出了 α 的经验公式

$$\alpha = \frac{N}{N + \frac{N}{30} \ln(v+1) + \frac{1}{3}v}. \quad (18)$$

采用归一化均方误差(Normalized mean square error, NMSE)^[13]进行误差分析, NMSE表达式为

$$\text{NMSE} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N |x(n) - \hat{x}(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |x(n)|^2} \right). \quad (19)$$

其中: x 表示实际值, \hat{x} 表示估计值. NMSE反映了拟合曲线与实际值的接近程度,显然NMSE的值越小,拟合曲线的数值计算结果越准确.

图1中的曲线是参数 α 的经验曲线,在不同条件下NMSE值如表1所示. 可以看出,经验公式(18)符合数值结果.

表1 不同条件下NMSE取值

参数设置	NMSE
$N=8, R=16, P_{fa}=10^{-2}$	-24.3635
$N=8, R=16, P_{fa}=10^{-3}$	-26.3145
$N=8, R=16, P_{fa}=10^{-4}$	-24.1190
$N=8, R=32, P_{fa}=10^{-3}$	-26.4781
$N=16, R=32, P_{fa}=10^{-3}$	-26.5802
$N=16, R=64, P_{fa}=10^{-3}$	-28.3522

4 性能分析

本文采用 Monte Carlo 仿真对方差矩阵的精度以及 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的 CFAR 特性和检测性能进行分析. 仿真中, 杂波协方差矩阵结构 Σ 采用指数相关结构^[9]进行建模, 即

$$\Sigma_{i,j} = \gamma^{|i-j|}, 1 \leq i, j \leq N, \quad (20)$$

其中 γ 表示杂波的一阶相关系数.

4.1 估计精度分析

本节采用估计矩阵迹约束后归一化的 Frobenius 范数 (CNFN)^[14] 来评价协方差矩阵估计方法的精度, 具体定义如下:

$$\varepsilon = \frac{E \left[\left\| \frac{N}{\text{tr}(\hat{\Sigma})} \hat{\Sigma} - \Sigma \right\|_F \right]}{\|\Sigma\|_F}. \quad (21)$$

其中: $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数, $\hat{\Sigma}$ 表示协方差矩阵的估计值. 仿真中, 取 $N = 8, R = 16, v = 2$, 每一个估计误差值由 1000 次 Monte Carlo 仿真取平均得到, 仿真结果如图 2 所示.

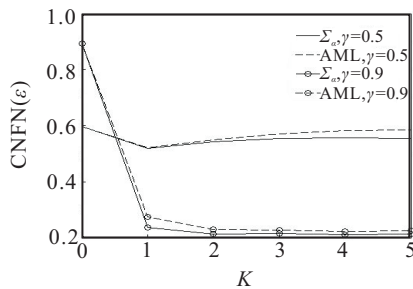


图 2 $\gamma = 0.5, 0.9$ 时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 和 AML 的估计精度分析

由图 2 可见: 当 $K \geq 3$ 时, $\hat{\Sigma}_\alpha$ 估计精度 CNFN(ε) 趋于稳定, 即 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 趋于收敛, 并且 CNFN(ε) 随着 γ 的增大而减小, 估计精度随着 γ 的增大而提高. 在不同的环境下, 对于不同的迭代次数 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 的估计精度要高于 AML.

4.2 CFAR 分析

本节主要从不同的杂波尖峰程度和不同的归一化协方差矩阵结构两个方面分析 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的 CFAR 特性. 仿真中, 给定 $N = 8, R = 16$, 检测器的 CFAR 曲线如图 3 所示.

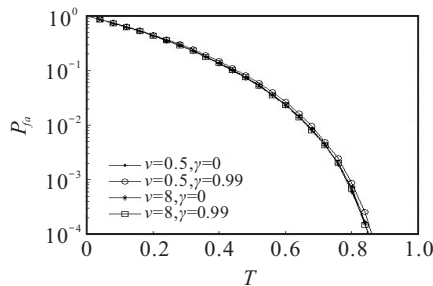


图 3 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的 CFAR 特性

由图 3 中可以看出, 在不同的 γ 和 v 的环境下, $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 对应的曲线基本重合, 说明检测器受杂波

归一化协方差矩阵及杂波纹理分量的影响极小, 可以认为 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 在有限迭代次数下是渐近 CFAR 的. SCM-ANMF 对方差矩阵结构具有 CFAR 特性, 但受杂波纹理分量的影响; NSCM-ANMF 与杂波纹理分量无关, 但对方差矩阵结构不具有 CFAR 特性^[7].

4.3 检测性能分析

本节在 K 分布杂波背景下, 对 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的检测性能进行仿真分析, 并与 SCM-ANMF、NSCM-ANMF 和 AML-ANMF 进行比较. 仿真中, 给定 $P_{fa} = 10^{-3}$, 仿真结果如图 4~图 7 所示.

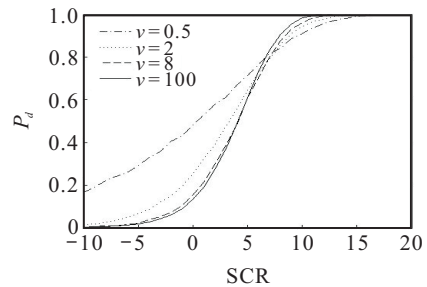


图 4 $\gamma = 0, N = 8, R = 16, v = 0.5, 2, 8$ 和 100 时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的 ROC 曲线

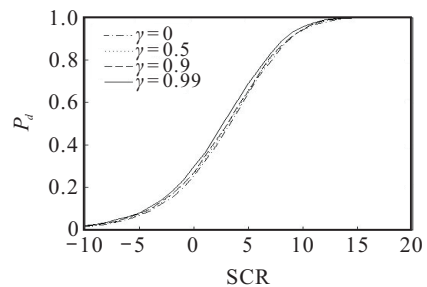


图 5 $\gamma = 0, 0.5, 0.9$ 和 0.99, $N = 8, R = 16, v = 2$ 时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的 ROC 曲线

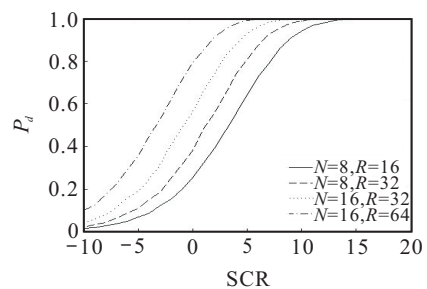


图 6 $\gamma = 0, N = 8$ 和 16, $R = 16$ 和 32, $v = 2$ 时 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF 的 ROC 曲线

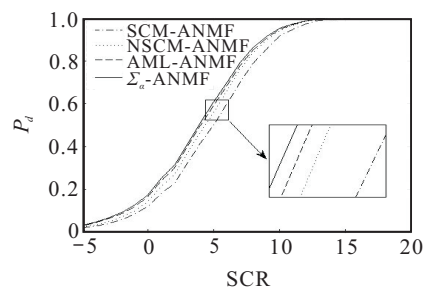


图 7 $\gamma = 0, N = 8, R = 16, v = 2$ 时自适应检测器的 ROC 曲线

由于 v 越小,杂波中的尖峰分量越多,由图4可以看出,在非高斯性较强的杂波环境中($v = 0.5$),ROC曲线较平缓;随着杂波趋于高斯杂波,ROC曲线在 $P_d > 0.8$ 时检测性能逐渐提升,但在低SCR下检测性能有所下降。

由图5可知,参数 γ 对 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF的检测性能影响不大,随着 γ 的增加检测性能会略有提升。由图6可以看出, $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF的检测性能随 N 和 R 的增加逐步提高。由图7可知, $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF的检测性能始终优于SCM-ANMF、NSCM-ANMF和AML-ANMF,说明在高斯和复合高斯二者之间的过渡杂波环境中, $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF的检测效果更好,体现了 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF对杂波非高斯程度时空渐变性的自适应性能。

5 结论

本文提出了协方差矩阵结构融合估计方法,拟合出了控制参数 α 的经验公式,并研究了 $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF的估计精度、CFAR特性和检测性能。研究结果表明:1) $\hat{\Sigma}_\alpha$ 收敛速度快,并且估计精度始终高于AML;2) 对于给定的检测门限,在有限次迭代下, $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF对协方差矩阵结构和杂波纹理分量是渐近CFAR的;3) $\hat{\Sigma}_\alpha$ -ANMF在介于高斯和复合高斯的过渡杂波环境下具有更好的目标检测性能。下一步将重点研究控制参数的理论表达式以及在不同杂波分布下的普适性,并通过实测数据验证融合估计器的有效性。

参考文献(References)

- [1] 刘明. 海杂波中微弱运动目标自适应检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学电子工程学院, 2016. (Liu M. Research on adaptive detection methods of weak moving targets in sea clutter[D]. Xi'an: School of Electronic Engineering, Xidian University, 2016.)
- [2] 谢洪森, 邹鲲, 周鹏. 低掠射角海杂波的统计特性分析[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(2): 172-179. (Xie H S, Zou K, Zhou P. Statistical analysis of sea clutter at low grazing angle[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(2): 172-179.)
- [3] 邹鲲, 廖桂生, 李军. 复合高斯杂波中知识辅助检测器的先验信息感知方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(8): 993-1003. (Zou K, Liao G S, Li J. Prior information cognitive method for knowledge aided detector in compound gaussian clutter [J]. Scientia: Sinica: Information Sciences, 2014, 44(8): 993-1003.)
- [4] Kelly E J. An adaptive detection algorithm[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(1): 115-127.
- [5] Conte E, Lops M, Ricci G. Adaptive matched filter detection in spherically invariant noise[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, 3(8): 248-250.
- [6] 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. (Gu X F, Jian T, He Y, et al. Generalized approximate maximum likelihood estimation of covariance matrix structure[J]. J of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2013, 31(6): 585-592.)
- [7] 何友, 简涛, 苏峰, 等. 非高斯杂波协方差矩阵估计方法及CFAR特性分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(1): 90-99. (He Y, Jian T, Su F, et al. CFAR Assessment of covariance matrix estimators for non-Gaussian clutter[J]. Scientia Sinica Information Sciences, 2011, 41(1): 90-99.)
- [8] Conte E, Lops M, Ricci G. Asymptotically optimum radar detection in compound-Gaussian clutter[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(2): 617-625.
- [9] He Y, Jian T, Su F, et al. Adaptive detection application of covariance matrix estimator for correlated non-Gaussian clutter[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 2108-2117.
- [10] Conte E, Maio A D, Ricci G. Covariance matrix estimation for adaptive CFAR detection in compound-Gaussian clutter[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 415-426.
- [11] Pascal F, Chitour Y, Ovarlez J P, et al. Covariance structure maximum-likelihood estimates in compound Gaussian noise: existence and algorithm analysis[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(1): 34-47.
- [12] Shui P L, Liu M, Xu S W. Shape-parameter-dependent coherent radar target detection in K -distributed clutter[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1): 451-465.
- [13] 王智, 简涛, 何友. 基于变参数广义结构的距离扩展目标检测方法[J]. 宇航学报, 2018, 39(3): 332-338. (Wang Z, Jian T, He Y. Generalized range-spread target detection method based on variable parameter[J]. J of Astronautics, 2018, 39(3): 332-338.)
- [14] 顾新锋, 简涛, 何友, 等. 协方差矩阵结构的广义杂波分组估计方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(12): 1794-1800. (Gu X F, Jian T, He Y, et al. Generalized clutter-clustered estimation of covariance matrix structure[J]. J of Astronautics, 2012, 33(12): 1794-1800.)

作者简介

王智(1992—), 男, 博士生, 从事目标自适应检测技术的研究, E-mail: wzxxrh@163.com;

简涛(1980—), 男, 副教授, 博士, 从事雷达信号处理的研究, E-mail: work_jt@163.com;

何友(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事信息融合、信号处理等研究, heyou_f@126.com.

(责任编辑: 孙艺红)