

适用于子空间信号失配的参数可调多通道自适应检测器

刘维建 简涛 杨海峰 李胜喜 王欢 王永良*
(空军预警学院 武汉 430019)

摘要: 针对存在信号失配时的子空间信号检测问题, 该文提出一种具有恒虚警特性的参数可调检测器。根据系统设计需要, 通过调节参数, 参数可调检测器可实现对失配信号的灵活检测。与现有检测器相比, 当不存在信号失配时, 提出的可调检测器能提供更高的检测概率。该文推导了可调检测器解析的检测概率和虚警概率, 并通过蒙特卡洛仿真进行了验证。

关键词: 目标检测; 多通道信号检测; 子空间信号失配; 自适应信号检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3011-07

DOI: 10.11999/JEIT161072

Tunable Multichannel Adaptive Detector for Mismatched Subspace Signals

LIU Weijian JIAN Tao YANG Haifeng LI Shengxi WANG Huan WANG Yongliang
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: For the detection issue in the presence of subspace signal mismatch, a parametrically tunable detector is proposed, which processes the Constant False Alarm Rate (CFAR) properties. By changing the tunable parameter, the proposed detector can flexibly detect the mismatched subspace signal. Moreover, in the case of no signal mismatch, the proposed tunable detector can even achieve better detection performance than the existing detectors. The expressions for the probabilities of detection and false alarm are proposed and verified with Monte Carlo simulations.

Key words: Target detection; Multichannel signal detection; Subspace signal mismatch; Adaptive signal detection

1 引言

雷达自诞生以来, 其功能不断扩展及完善, 但目标检测始终是最重要的功能之一。由于元器件制造工艺水平的限制, 早期的雷达往往只有单个通道, 获取到的目标信息有限, 而且在复杂环境中的信号处理能力有限, 制约了雷达作战效能的发挥。20 世纪 60 年代兴起了对相控阵雷达的研究热潮。相控阵雷达可通过多个阵元独立发射和接收数据, 能够获取更多的信息。此外, 多通道模型能够刻画不同通道之间信号的相关特性, 为通过信号处理提升雷达系统的性能提供了可能性。

多通道信号检测最早由 Brennan 等人^[1]于 1973 年开始研究。基于机载雷达杂波抑制的背景, Brennan 等人^[1]证明了在高斯杂波环境下, 采用先滤波后检测的思想, 使滤波后的输出信杂噪比最大等价于使滤波后再检测的检测概率最大, 从而开创了机载雷达空时自适应处理 (Space-Time Adaptive Processing, STAP) 理论。在此基础上, 各种 STAP

方法被不断提出, 并形成较完善的理论体系^[2-4]。值得指出的时, 最大输出信杂噪比等价于最大检测概率这一结论是在下面两个重要前提下得到的: (1) 待检测数据中的噪声及杂波分量服从高斯分布, 且其协方差矩阵已知; (2) 先对待检测数据进行滤波, 然后再检测。

实际环境中, 噪声及杂波的协方差矩阵是未知的, 而且不一定服从高斯分布。此时, 使输出信杂噪比最大不能保证得到最大检测概率。若直接利用待检测数据和训练样本联合进行检测器设计, 可得到比分步检测更高的检测概率, 该技术被称为多通道信号自适应检测技术。与先滤波后检测的分步检测技术相比, 自适应检测技术具有 3 个突出的优点^[5]: (1) 采用自适应检测技术设计得到的检测器通常具有恒虚警 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 特性, 不需要额外的 CFAR 处理, 大大简化了目标检测的流程和成本。(2) 自适应检测技术通常比分步检测方法具有更高的检测概率。(3) 自适应检测器设计灵活, 可根据不同的准则、基于不同的度量进行设计。可采用的检测器设计准则包括: 广义似然比

准则(Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT)准则、Rao 准则、Wald 准则^[6], 以及 3 种准则的两步实现。

多通道信号自适应检测理论最早由美国林肯实验室的 Kelly 教授^[7]于 1986 年提出, 基于 GLRT 准则, 在高斯杂波背景下, Kelly 教授提出了针对多通道数据的 GLRT(KGLRT)检测器。在 Kelly 教授的研究基础上, 多种检测器被提出, 例如, 自适应匹配滤波器^[8](Adaptive Matched Filter, AMF)、De Maio^[9]的 Rao 检测器(DMRao)、自适应正交抑制检测器(Adaptive Orthogonal Rejection Detector, AORD)^[10]。此外, 学术界在非高斯杂波中的自适应检测也取得了众多成果, 例如文献[11-15]及其中参考文献。

上述检测器均针对秩一信号的检测, 秩一信号指的是具有已知导向矢量的信号。子空间信号是秩一信号的推广, 指的是信号位于已知的子空间中, 但在该子空间中的坐标未知。子空间信号具有更广泛的应用, 例如, 直升机检测^[16]、极化目标检测^[17]等。KGLRT, AMF 和 DMRao 检测器的子空间推广分别在文献[18], 文献[19]和文献[20]中给出。近年来, 学术界对子空间信号检测的研究取得了众多成果, 例如文献[21-25]及其中的参考文献。

上述研究均未考虑信号失配的情形, 然而, 在实际环境中不可避免地存在阵元误差、互耦、通道误差、指向偏差、多径效应等因素的影响, 导致信号存在失配现象, 即实际信号的导向矢量与系统的假定值不同。根据对失配信号的不同检测特性, 检测器可分为稳健检测器和失配敏感检测器。稳健检测器指的是, 当信号存在失配时, 检测器能以较高的概率检测到信号; 失配敏感检测器指的是, 检测概率随信号失配量的增加迅速降低的检测器。值得指出的是, 并非在所有情况下, 都希望选择稳健检测器。对远程警戒雷达来说, 理想的检测器应对失配信号具有较好的稳健性; 而对火控雷达或炮瞄雷达来说, 理想的检测器应具有失配敏感特性, 不把失配量较大的信号作为真实信号。

针对秩一信号失配的检测问题, 文献[26, 27]通过增加虚拟确定干扰, 提出了相应的失配敏感检测器。文献[28, 29]提出了多种级联检测器, 即级联两个对失配信号检测特性不同的检测器(一个为稳健检测器, 一个为失配敏感检测器)。级联检测器具有双检测门限, 通过调整门限对, 实现对失配信号的灵活检测。最近, 文献[30]对级联检测器进行了综述和性能分析。此外, 文献[31]提出了一种参数可调检测器, 通过调节参数, 可实现对失配信号的稳健检

测或抑制, 但该可调检测对失配信号的可调节特性有限, 最稳健程度只能达到 AMF 的程度, 最敏感程度只能达到 KGLRT 的程度。为此, 文献[32]提出了灵活性更好的双参数可调检测器。

值得指出的是, 上述文献均只适用于秩一信号。学术界对子空间信号失配下的检测问题研究不足, 仅有少量公开发表的文章见诸报道。文献[33]分析了 3 种常见检测器在子空间信号失配下的统计分布, 得到了解析的检测概率和虚警概率。文献[34]通过增加虚拟确定干扰, 提出了两种适用于扩展目标的失配敏感检测器。尽管失配敏感检测器能对失配信号进行很好的抑制, 但是不具有稳健特性, 也不能对失配信号进行灵活检测。为此, 本文提出一种适用于子空间信号失配的参数可调检测器, 通过调节参数, 实现对失配信号的灵活检测或者抑制。推导了子空间参数可调检测器的统计分布, 进而得到了解析的检测概率和虚警概率, 并通过蒙特卡洛仿真进行了验证。

2 检测模型及检测器设计

以机载雷达为背景, 假设阵元数为 N_a , 脉冲数为 N_b , 则系统维数为 $N = N_a N_b$ 。用 $N \times 1$ 维列向量 \mathbf{x} 表示待检测单元接收数据。对于二元假设检验, 在假设检验 H_0 下, \mathbf{x} 仅含有噪声 \mathbf{n} , 通常 \mathbf{n} 包括杂波和热噪声; 在假设检验 H_1 下, 包含噪声 \mathbf{n} 和信号 \mathbf{s} 。假设 \mathbf{s} 位于由 $N \times p$ 维列满秩矩阵 \mathbf{H} 张成的子空间中, 记作 $\langle \mathbf{H} \rangle$, 则 \mathbf{s} 可表示为 $\mathbf{s} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}$, 其中 $p \times 1$ 维未知列向量 $\boldsymbol{\theta}$ 表示 \mathbf{s} 在子空间 $\langle \mathbf{H} \rangle$ 中的坐标。假设噪声 \mathbf{n} 服从均值为 $\mathbf{0}$ 、协方差矩阵为 \mathbf{R} 的复高斯分布, 记作 $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}_N(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ 。在实际应用中, \mathbf{R} 通常是未知的, 为此需要一定数量的训练样本进行估计。假设存在 L 个独立同分布的训练样本 \mathbf{x}_l , $l = 1, 2, \dots, L$, \mathbf{x}_l 仅包含噪声分量 \mathbf{n}_l , 且 $\mathbf{n}_l \sim \mathcal{CN}_N(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ 。则检测问题可表示为

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{x} &= \mathbf{n}, & \mathbf{x}_l &= \mathbf{n}_l, l = 1, 2, \dots, L \\ H_1: \mathbf{x} &= \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{n}, & \mathbf{x}_l &= \mathbf{n}_l, l = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

模型式(1)具有广泛的适用性, 当 $p = 1$ 时, 矩阵 \mathbf{H} 变为列向量, 此时检测问题退化为秩一信号检测问题。

针对式(1)中的检测问题, 文献[18]提出了相应的子空间 GLRT 检测器, 其表达式为

$$t_{\text{SGLRT}} = \frac{\mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}}{1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x} - \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{S} = \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l \mathbf{x}_l^H$ 为采样协方差矩阵(Sample

Covariance Matrix, SCM)。为叙述方便, 称式(2)中的检测器为子空间 GLRT(Subspace-based GLRT, SGLRT)。SGLRT 的一个统计等价形式为

$$t'_{\text{SGLRT}} = \frac{1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}}{1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x} - \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}} \quad (3)$$

式(2)与式(3)统计等价是由于 $t_{\text{SGLRT}} = t'_{\text{SGLRT}} - 1$ 。

此外, 针对式(1)中的检测问题, 文献[34]提出了如式(4)所示的失配敏感检测器:

$$t_{\text{ADD-MSR}} = \frac{1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}}{\left[1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x} - \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}\right]^2} \quad (4)$$

式(4)的检测器在文献[34]中被称为具有失配信号抑制能力的自适应方向检测器(Adaptive Direction Detector with Mismatched Signal Rejection, ADD-MSR)。

通过比较式(3)和式(4), 我们提出如式(5)所示的参数可调检测器:

$$t_{\text{TADD}} = \frac{1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}}{\left[1 + \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x} - \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}\right]^\gamma} \quad (5)$$

并称其为参数可调的 ADD(Tunable ADD, TADD), 其中非负数 γ 为可调参数。

值得指出的是, TADD可看做检测器簇, 而非单一的检测器。例如, 当 $\gamma = 1$ 时, 式(5)退化为式(3)所示的SGLRT检测器; 当 $\gamma = 2$ 时, 式(5)退化为式(4)所示的ADD检测器; 当 $\gamma = 0$ 时, 式(5)退化为

$$t_{\text{AED}} = \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x} \quad (6)$$

该检测器被称为自适应能量检测器(Adaptive Energy Detector, AED)^[35]。

3 子空间信号失配下 TADD 的统计特性

当存在信号失配时, 实际信号(记作 \mathbf{s}_0)不一定完全位于系统所假设的信号子空间 $\langle \mathbf{H} \rangle$ 中。因此, 定义失配度量

$$\cos^2 \phi = \frac{\mathbf{s}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}_0}{\mathbf{s}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}_0} \quad (7)$$

式(7)度量了实际信号 \mathbf{s}_0 与 $\langle \mathbf{H} \rangle$ 在白化空间的夹角。

此外, 为叙述方便, 定义损失因子

$$\beta = \frac{1}{1 + \mathbf{s}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}_0} \quad (8)$$

利用式(2)和式(8)可把式(5)写为

$$t_{\text{TADD}} = \beta^{\gamma-1} (1 + t_{\text{SGLRT}}) \quad (9)$$

文献[33]得到了式(2)中 SGLRT 和式(8)中损失因子在子空间信号失配下的统计分布。利用这些结果及式(9)可得到 TADD 的检测概率和虚警概率, 具体计算过程如下。

TADD 的检测概率可写为

$$\begin{aligned} \text{PD} &= \Pr[t_{\text{TADD}} > \eta; \mathbf{H}_1] \\ &= \Pr[\beta^{\gamma-1} (1 + t_{\text{SGLRT}}) > \eta; \mathbf{H}_1] \\ &= \Pr[t_{\text{SGLRT}} > \beta^{1-\gamma} \eta - 1; \mathbf{H}_1] \\ &= 1 - \Pr[t_{\text{SGLRT}} \leq \beta^{1-\gamma} \eta - 1; \mathbf{H}_1] \\ &= 1 - \int_0^1 \mathcal{P}_1(\beta^{1-\gamma} \eta - 1) f_1(\beta) d\beta \end{aligned} \quad (10)$$

其中, η 为 TADD 的检测门限, $\mathcal{P}_1(\eta)$ 为式(2)中 t_{SGLRT} 在假设检验 \mathbf{H}_1 下的积累分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF), 即

$$\mathcal{P}_1(\eta) = \Pr[t_{\text{SGLRT}} \leq \eta; \mathbf{H}_1] \quad (11)$$

$f_1(\beta)$ 为 β 在假设检验 \mathbf{H}_1 下的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)。

根据文献[33]得到, 在假设检验 \mathbf{H}_1 下 β 的统计分布为非中心复贝塔分布, 其自由度为 $L - N + p + 1$ 和 $N - p$, 非中心参数为 δ^2 , 记作

$$\beta_{\mathbf{H}_1} \sim \mathcal{CB}_{L-N+p+1, N-p}(\delta^2) \quad (12)$$

其中,

$$\delta^2 = \rho \sin^2 \phi \quad (13)$$

$$\rho = \mathbf{s}_0^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{s}_0 \quad (14)$$

为最优输出信噪比(Signal-to-Clutter-plus-Noise Ratio, SCNR), $\sin^2 \phi = 1 - \cos^2 \phi$, $\cos^2 \phi$ 在式(7)中给出。根据文献[36]中的式(A2-12)和(A2-23)得到

$$f_1(\beta) = (L - N + p + 1) L! e^{-\delta^2 \beta} \beta^{L-N+p} \cdot \sum_{k=0}^{L-N+p+1} \frac{\delta^{2k} (1 - \beta)^{N-p+k-1}}{k! (L - N + p - k + 1)! (N - p + k - 1)!} \quad (15)$$

此外, 根据文献[36]得到式(11)中的积累分布函数为

$$\mathcal{P}_1(\eta) = \begin{cases} g_1(\eta), & \eta' > 0 \\ 0, & \eta' \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中,

$$g_1(\eta) = \sum_{k=0}^{L-N} C_{L-N+p}^{k+p} \frac{\eta'^{k+s}}{(1 + \eta')^{L-N+s}} \text{IG}_{k+1} \left(\frac{\rho_\phi \beta}{1 + \eta'} \right) \quad (17)$$

$C_m^n = m! / [n!(m-n)!]$ 为二项式系数, $\text{IG}_{k+1}(a) = e^{-a} \sum_{m=0}^k a^m / m!$ 为不完全伽马函数。

根据式(10)和式(16)得到

$$\mathcal{P}_1(\beta^{1-\gamma}\eta - 1) = \begin{cases} g_1(\beta^{1-\gamma}\eta - 1), & \beta^{1-\gamma} > \eta^{-1} \\ 0, & \beta^{1-\gamma} \leq \eta^{-1} \end{cases} \quad (18)$$

由式(8)知, $0 \leq \beta \leq 1$, 结合式(18)得到 TADD 的检测概率可根据下面 4 类情况计算得到:

(1)当 $0 \leq \gamma < 1$ 且 $0 \leq \eta < 1$ 时,

$$PD = 1 \quad (19)$$

(2)当 $0 \leq \gamma < 1$ 且 $\eta \geq 1$ 时,

$$PD = 1 - \int_{\eta^{-1/(1-\gamma)}}^1 g_1(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_1(\beta)d\beta \quad (20)$$

(3)当 $\gamma \geq 1$ 且 $0 \leq \eta < 1$ 时,

$$PD = 1 - \int_0^{\eta^{-1/(1-\gamma)}} g_1(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_1(\beta)d\beta \quad (21)$$

(4)当 $\gamma \geq 1$ 且 $\eta \geq 1$ 时,

$$PD = 1 - \int_0^1 g_1(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_1(\beta)d\beta \quad (22)$$

采用与式(10)类似的方法, TADD 的虚警概率可表示为

$$PFA = \Pr[t_{TADD-MSR} > \eta; H_0] = 1 - \int_0^1 \mathcal{P}_0(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_0(\beta)d\beta \quad (23)$$

其中, $\mathcal{P}_0(\eta)$ 为式(2)中 t_{SGLRT} 在假设检验 H_0 下的累积分布函数, 即

$$\mathcal{P}_0(\eta) = \Pr[t_{SGLRT} \leq \eta; H_0] \quad (24)$$

$f_0(\beta)$ 为 β 在假设检验 H_0 下的概率密度函数。

在假设检验 H_0 下不存在信号, 因此在式(16)中令 $\delta^2 = 0$, 得到

$$\mathcal{P}_0(\eta) = \begin{cases} g_0(\eta), & \eta' > 0 \\ 0, & \eta' \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

其中,

$$g_0(\eta) = \sum_{k=0}^{L-N} C_{L-N+p}^{k+p} \frac{\eta^{k+s}}{(1+\eta)^{L-N+s}} \quad (26)$$

此外, 在式(15)中令 $\delta^2 = 0$ 得到假设检验 H_0 下 β 的概率密度函数为

$$f_0(\beta) = \beta^{L-N+p} (1-\beta)^{N-p-1} \cdot \frac{L!}{(L-N+p)!(N-p-1)!} \quad (27)$$

采用式(19)~式(22)类似的方法得到 TADD 的虚警概率计算表达式为

(1)当 $0 \leq \gamma < 1$ 且 $0 \leq \eta < 1$ 时,

$$PFA = 1 \quad (28)$$

(2)当 $0 \leq \gamma < 1$ 且 $\eta \geq 1$ 时,

$$PFA = 1 - \int_{\eta^{-1/(1-\gamma)}}^1 g_0(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_0(\beta)d\beta \quad (29)$$

(3)当 $\gamma \geq 1$ 且 $0 \leq \eta < 1$ 时,

$$PFA = 1 - \int_0^{\eta^{-1/(1-\gamma)}} g_0(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_0(\beta)d\beta \quad (30)$$

(4)当 $\gamma \geq 1$ 且 $\eta \geq 1$ 时,

$$PFA = 1 - \int_0^1 g_0(\beta^{1-\gamma}\eta - 1)f_0(\beta)d\beta \quad (31)$$

值得指出的是, 从式(28)~式(31)看出, TADD 的虚警概率不依赖于噪声协方差矩阵 \mathbf{R} , 因此, TADD 具有恒虚警特性。

4 计算机仿真验证

本节评估 TADD 的检测性能, 首先验证虚警概率的理论结果, 然后分两种情况考察检测概率, 即存在子空间信号失配和不存在信号失配。为了验证统计性能分析的正确性, 除了给出根据解析表达式计算得到的检测概率和虚警概率外, 还给出了根据蒙特卡洛仿真得到的结果。对于蒙特卡洛仿真, 检测门限和检测概率分别通过 $100/PFA$ 和 10^4 次蒙特卡洛实验得到, 其中 PFA 表示虚警概率(Probability of False Alarm, PFA)。噪声协方差矩阵的第 (i, j) 个元素为 $\mathbf{R}_{i,j} = \sigma^2 \varepsilon^{|i-j|}$, $i, j = 1, 2, \dots, N$ 。在所有仿真中, 均令 $N_a = 3, N_p = 4, \sigma^2 = 1, \varepsilon = 0.95$ 。此外, 除了图 1 外, 虚警概率均设为 $PFA = 10^{-3}$ (在实际应用中虚警概率往往很低, 例如 $PFA = 10^{-6}$, 此处设置为 $PFA = 10^{-3}$ 是为了降低计算量, 虚警概率为其他值时, 检测器的变化趋势不变)。

4.1 检测门限验证

图 1 给出了不同检测门限下 TADD 的虚警概率。从图中可以看出, 理论值与蒙特卡洛仿真结果能够较好地匹配, 这验证了理论结果的正确性。可以看出, 随着检测门限的提高, 虚警概率不断降低。此外, 可调参数越大, 检测门限越低。

4.2 存在子空间信号失配时的检测性能分析

图 2 给出了不同子空间信号失配量下各检测器的检测性能。从图中可以看出, TADD 的检测概率理论值与蒙特卡洛仿真结果匹配较好。当 $\gamma = 0.59$ 时, TADD 具有最稳健的特性; 当 $\gamma = 3$ 时, TADD 具有最优的失配抑制特性。观察式(5)中 TADD 的表达式可以看出, 当可调参数 γ 较小时, TADD 接近 AED 检测器。AED 检测器不区分信号是否失配, 而是积累待检测数据中的所有能量, 因此对失配信号具有最稳健的检测性能。反之, 当可调参数 γ 较大时, TADD 分母中的物理量 $\mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x} - \mathbf{x}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H} \cdot (\mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{S}^{-1} \mathbf{x}$ 所占的比重随着信号失配量的增加而变大, 因此, TADD 的统计值越来越小, 体现出对失配信号良好的失配敏感特性。

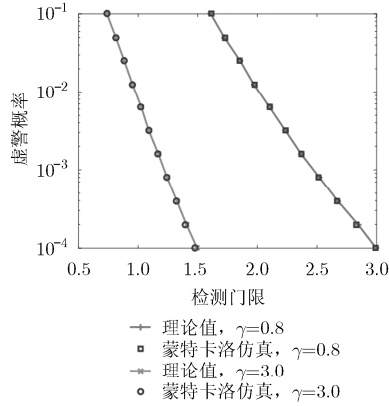


图1 不同检测门限下的虚警概率

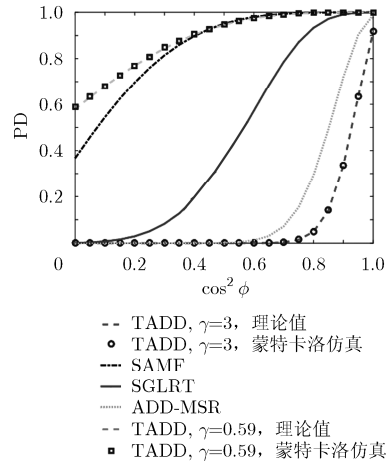


图2 不同失配量下各检测器的检测概率

图3给出了可调参数 $\gamma = 0.5$ 和 $\gamma=3.0$ 时 TADD 的检测概率等高线图。从图中可以看出，当可调参数较小时，TADD 具有很好的稳健特性，即使失配量较大时，只要信号的 SCNR 足够大，就可检测到目标。反之，当可调参数较大时，对于失配量较大的信号，即使 SCNR 再大，都不可能检测到，即，此时 TADD 具有很好的失配敏感特性。因此，通过调节可调参数可实现对失配信号的灵活检测。

4.3 不存在子空间信号失配时的检测性能分析

图4给出了不存在信号失配时不同 SCNR 下各检测器的检测性能，其中 $\gamma = 0.8$ 。从图中可以看出，在该参数设置下，TADD 可提供与 SGLRT 相当的检测性能，且均比其他检测器的检测性能更好。特别地，在某些 SCNR 下，TADD 可提供比 SGLRT 略高的检测概率。

图5给出了不存在信号失配时，不同可调参数下 TADD 的检测概率。从图中可看出，当 $0 < \gamma < 0.8$ 时，检测概率随着可调参数的增加而增加；当 $\gamma \geq 0.8$ 时，检测概率随着可调参数的增加而降低。在区间 $0.5 < \gamma < 1.0$ 内，TADD 的检测概率均略高

于其他检测器。此外，当 $\gamma = 0, \gamma = 1.0$ 和 $\gamma=2.0$ 时，TADD 的检测概率分别与 AED, SGLRT 和 ADD 的检测概率相同，这验证了本文第2节的分析，即在这3个可调参数下，TADD 分别退化为 AED, SGLRT 和 ADD-MSR。

图6给出了不存在信号失配时，TADD 的最优可调参数及相应的检测概率，最优可调参数指的是具有最高检测概率时的可调参数。从图中可以看出，当选择最优参数时在整个 SCNR 区间，TADD 的检测概率比 SGLRT 略高。

5 结论

针对存在子空间信号失配下的检测问题，本文提出了一种参数可调检测器，即TADD，分析了检测器的统计特性，得到了解析的检测概率和虚警概率。根据不同的设计需求，通过调节参数，TADD 检测可实现对失配子空间信号的稳健检测或者抑制。此外，当不存在信号失配时，在合理的参数设置下，TADD检测器可提供比现有子空间检测器相当的检测概率。

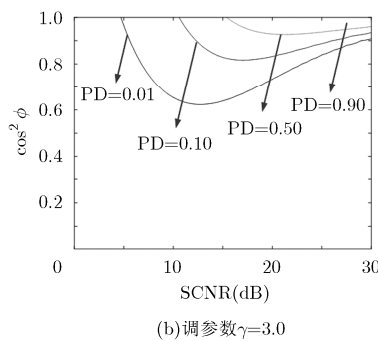
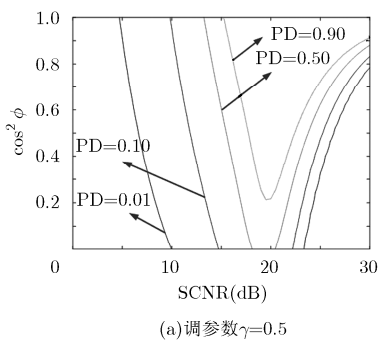


图3 不同 SCNR 和 $\cos^2\phi$ 下 TADD 的检测概率等高线图

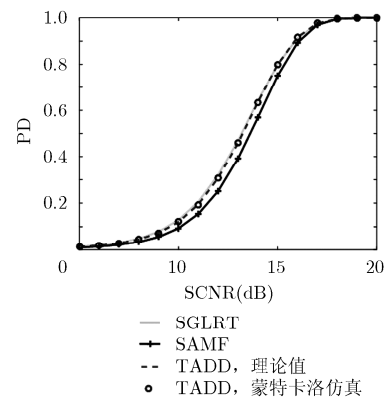


图4 无信号失配时不同 SCNR 下各检测器的检测概率

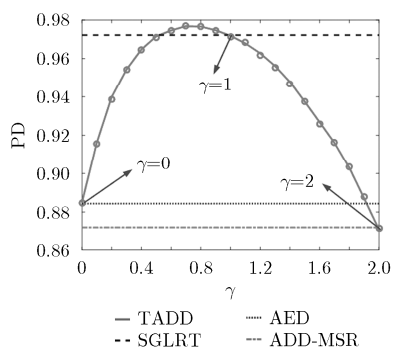
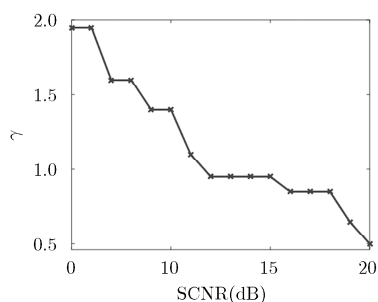
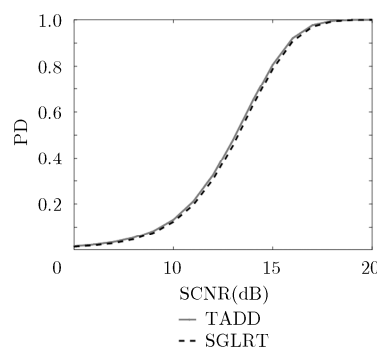


图5 无信号失配时不同可调参数下 TADD 的检测概率



(a)最优可调参数



(b)最优可调参数下的检测性能

图6 无信号失配时 TADD 的最优可调参数及相应的检测概率

参考文献

- [1] BRENNAN L E and REED L S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237-252.
- [2] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
WANG Y and PENG Y. Space-time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [3] KLEMM R. Principles of Space-time Adaptive Processing[M]. 3rd ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 2006.
- [4] GUERCI J R. Space-time Adaptive Processing for Radar[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2014.
- [5] 王永良, 刘维建, 谢文冲, 等. 机载雷达空时自适应检测方法研究进展[J]. *雷达学报*, 2014, 3(2): 201-207.
WANG Y, LIU W, and XIE W, et al. Research progress of space-time adaptive detection for airborne radar[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 201-207.
- [6] LIU W, WANG Y, and XIE W. Fisher information matrix, Rao test, and Wald test for complex-valued signals and their applications[J]. *Signal Processing*, 2014, 94(1): 1-5.
- [7] KELLY E J. An adaptive detection algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(1): 115-127.
- [8] ROBEY F C, FUHRMANN D R, KELLY E J, et al. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 208-216.
- [9] DE MAIO A. Rao test for adaptive detection in Gaussian interference with unknown covariance matrix[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(7): 3577-3584.
- [10] LIU W, LIU J, HU X, et al. Statistical performance analysis of the adaptive orthogonal rejection detector[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(6): 873-877.
- [11] 简涛, 苏峰, 何友, 等. 复合高斯杂波下距离扩展目标的自适应检测 [J]. *电子学报*, 2012, 40(5): 990-994.
JIAN T, SU F, HE Y, et al. Adaptive range-spread target detectors for compound-Gaussian clutter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 990-994.
- [12] 邹鲲, 廖桂生, 李军, 等. 非高斯杂波下知识辅助检测器敏感性分析[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(1): 181-186. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00320.
ZOU K, LIAO G, LI J, et al. Sensitivity analysis of knowledge aided detector in non-Gaussian clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(1): 181-186. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00320.
- [13] 施赛楠, 水鹏朗, 刘明. 基于复合高斯杂波纹理结构的相干检测[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(8): 1969-1976. doi: 10.11999/JEIT151194.
SHI S, SHUI P, and LIU M. Coherent detection based on texture structure in compound-gaussian clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 1969-1976. doi: 10.11999/JEIT151194.
- [14] KONG L, LIN C, CUI G, et al. Adaptive bayesian detection for multiple-input multiple-output radar in compound-gaussian clutter with random texture[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(4): 689-698.
- [15] SHUI P L, LIU M, and XU S W. Shape-parameter-dependent coherent radar target detection in k-distributed clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(1): 451-465.
- [16] GINI F and FARINA A. Matched subspace cfar detection of hovering helicopters[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1293-1305.
- [17] LEI S, ZHAO Z, NIE Z, et al. Adaptive polarimetric detection method for target in partially homogeneous background[J]. *Signal Processing*, 2015, 106: 301-311.
- [18] PASTINA D, LOMBARDO P, and BUCCIARELLI T. Adaptive polarimetric target detection with coherent radar — Part I: Detection against Gaussian background[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1194-1206.
- [19] LIU J, ZHANG Z J, and YANG Y. Optimal waveform design for generalized likelihood ratio and adaptive matched filter detectors using a diversely polarized antenna[J]. *Signal*

- Processing*, 2012, 92(4): 1126–1131.
- [20] LIU W, XIE W, LIU J, *et al.* Adaptive double subspace signal detection in Gaussian background — Part I: Homogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(9): 2345–2357.
- [21] REN B, SHI L, and WANG G. Polarimetric target detection using statistic of the degree of polarization[J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2016, 46: 143–152.
- [22] CIUONZO D, DE Maio A, and ORLANDO D. A unifying framework for adaptive radar detection in homogeneous plus structured interference[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(11): 2894–2906.
- [23] LIU W, WANG Y L, LIU J, *et al.* Design and performance analysis of adaptive subspace detectors in orthogonal interference and Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, accepted, doi: 10.1109/TAES.2016.140152.
- [24] LIU W, WANG Y, LIU J, *et al.* Robust GLRT approaches to signal detection in the presence of spatial-temporal uncertainty[J]. *Signal Processing*, 2015, 118: 272–284.
- [25] LIU J, LIU W, CHEN B, *et al.* Modified rao test for multichannel adaptive signal detection[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(3): 714–725.
- [26] PULSONE N B and RADER C M. Adaptive beamformer orthogonal rejection test[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(3): 521–529.
- [27] HAO C, SHANG X, BANDIERA F, *et al.* Bayesian radar detection with orthogonal rejection[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2012, E95-A(2): 596–599.
- [28] RICHMOND C D. Performance of the adaptive sidelobe blanker detection algorithm in homogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(5): 1235–1247.
- [29] HAO C, LIU B, and CAI L. Performance analysis of a two-stage rao detector[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(8): 2141–2146.
- [30] DE Maio A and ORLANDO D. A survey on two-stage decision schemes for point-like targets in gaussian interference[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(4): 20–29.
- [31] KALSON S Z. An adaptive array detector with mismatched signal rejection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 195–207.
- [32] LIU W, XIE W, and WANG Y. Parametric detector in the situation of mismatched signals[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(1): 48–53.
- [33] LIU W, LIU J, ZHANG C, *et al.* Performance prediction of subspace-based adaptive detectors with signal mismatch[J]. *Signal Processing*, 2016, 123: 122–126.
- [34] LIU W, LIU J, HUANG L, *et al.* Distributed target detectors with capabilities of mismatched subspace signal rejection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, accepted.
- [35] RAGHAVAN R S, QIU H F, and MCLAUGHLIN D J. Cfar detection in clutter with unknown correlation properties[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(2): 647–657.
- [36] KELLY E J and FORSYTHE K M. Adaptive detection and parameter estimation for multidimensional signal models[R]. Lincoln Laboratory, Lexington, 1989.
- 刘维建：男，1982年生，博士，讲师，主要研究方向为空时自适应检测、阵列信号处理、抗干扰技术。
- 简涛：男，1982年生，硕士，讲师，主要研究方向为雷达系统、信号处理。
- 杨海峰：男，1986年生，博士生，研究方向为空时自适应检测、阵列信号处理。
- 李胜喜：男，1977年生，硕士，讲师，主要研究方向为雷达系统、信号处理。
- 王欢：男，1982年生，硕士，助教，主要研究方向为装备效能评估、管理与应急保障。
- 王永良：男，1965年生，博士，中国科学院院士，主要研究方向为机载雷达信号处理、阵列信号处理、雷达系统设计。