

## 机载 MIMO 雷达广义最大似然检测器

王鞠庭 江胜利 何劲 刘中  
(南京理工大学电子工程系 南京 210014)

**摘要:** 该文针对机载 MIMO 雷达在未知统计特性的杂波中目标检测问题, 首先给出广义最大似然(GLRT)检测器(MIMO-GLRT), 利用 MIMO 雷达的空间分集特性提高检测性能, 并推导出检测概率和虚警概率表达式。然后, 基于 MIMO 雷达杂波协方差矩阵的块对角特性, 给出一种简化 MIMO-GLRT 检测器, 大大减小算法的复杂度, 同时降低对参考单元数目的要求, 并在只有两个接收雷达单元的情形下, 推导出简化 GLRT 检测性能的表达式。结果表明, 上述两种检测器相对于杂波协方差矩阵都具有恒虚警特性, 能够在未知杂波背景下有效地检测目标。

**关键词:** MIMO 雷达; 自适应检测; 广义最大似然; 恒虚警

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1315-04

## Generalized Likelihood Ratio Detector for Airborne MIMO Radars

Wang Ju-ting Jiang Sheng-li He Jin Liu Zhong

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** This paper studies the problem of signal detection in clutter with unknown statistical properties for the airborne MIMO radars. Firstly, a Generalized Likelihood Ratio Test Detector (GLRTD) is proposed to improve the detection performance exploiting the spatial diversity of MIMO radar, and the theoretical expression is derived for the detection performance. Secondly, a simplified GLRTD is derived based on the block diagonal property of clutter covariance matrix to reduce both the computational complexity and the secondary range cell numbers required for clutter covariance estimation, and a closed form expression of the detection performance is given for the special case of two receiver radar elements. The results show that both proposed detectors have CFAR with respect to the covariance matrix of clutter, and can effectively detect targets in clutter.

**Key words:** MIMO radar; Adaptive detection; GLRT; CFAR

### 1 引言

近年来, MIMO 雷达受到雷达界的广泛关注。目前的 MIMO 雷达研究主要集中在两种不同形式的 MIMO 系统: 第 1 类是基于相控阵体制的 MIMO 雷达<sup>[1,2]</sup>, 其雷达单元之间的间距足够小; 第 2 类是基于多基地或多站点的 MIMO 雷达<sup>[3-8]</sup>, 其收发单元间距足够大, 从而使得各单元信号相互独立, 以此获得空间分集提高雷达的检测和估计性能。本文重点研究第 2 类 MIMO 雷达。文献[3]首次提出此类 MIMO 雷达的概念, 在此基础上, 人们对 MIMO 雷达的波形设计<sup>[4]</sup>、参数估计<sup>[5]</sup>以及信号检测<sup>[6-8]</sup>等方面进行了深入的研究, 其基本思想是把传统雷达的相关成果推广到 MIMO 雷达。

在高斯背景下 MIMO 雷达目标检测的研究中, 文献[3]研究了 MIMO 雷达对静止目标的检测性能; 文献[6,7]将文献[3]的工作推广到运动目标检测领域; 文献[8]首次将 STAP 拓展到 MIMO 雷达中, 研究了机载 MIMO 雷达在二维杂波下的最优和分布式检测器。然而, 文献[3,6,8]是基于已知杂波协方

差统计特性的假设条件, 文献[7]则没有对 MIMO 雷达的检测性能进行理论分析。

众所周知, 机载雷达通常要在未知统计特性杂波中检测目标<sup>[9,10]</sup>。针对该问题, 人们在单基地雷达中已经开展了大量研究, 提出了各种自适应空时检测算法<sup>[9-13]</sup>。因此, 开展机载 MIMO 雷达自适应检测研究是 MIMO 雷达研究的一个重要方面。本文首先将单基地雷达的 GLRT 检测器推广到机载 MIMO 雷达, 提出 MIMO-GLRT 检测器, 充分利用 MIMO 雷达的分集特性减小目标角闪烁和小径向速度对雷达检测性能的影响, 并从理论上分析其检测性能。然后, 根据杂波协方差矩阵的块对角特性, 提出一种具有恒虚警特性的简化 MIMO-GLRT 检测器, 大大减小 GLRT 的复杂度, 同时降低对 IID 参考单元数目的要求, 因此有利于 MIMO 雷达的实时处理, 具有一定的实用价值。

### 2 机载 MIMO 雷达回波模型

为方便讨论起见, 本文研究如图 1 所示的机载 MIMO 雷达系统<sup>[6]</sup>, 它由一个发射雷达单元和位于不同位置的  $M$  个接收雷达单元构成, 各雷达单元位于不同载机上, 假设 MIMO 雷达系统工作在同步状态, 不考虑系统构形变化,

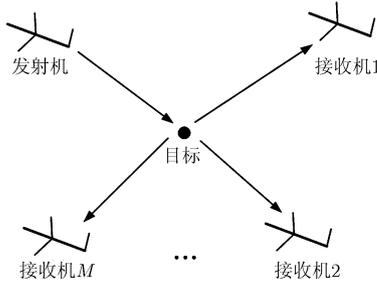


图1 机载 MIMO 雷达结构框图

运动误差等影响。假设发射雷达单元在一个相干处理周期(CPI)发射  $N_t$  个脉冲, 第  $m$  个接收雷达单元采用阵元数为  $N_m$  的阵列天线接收回波, 其接收到待测距离单元和第  $k$  个参考距离单元的空时回波分别为  $\mathbf{z}_{pm}$  和  $\mathbf{z}_{mk}$  ( $m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K$ ), 相应的杂波分量为  $\mathbf{n}_{pm}$  和  $\mathbf{n}_{mk}$ , 目标的归一化空间频率和多普勒频率分别为  $f_{sm}$  和  $f_{dm}$ , 目标回波强度为  $a_m$ , 则 MIMO 雷达对目标的检测可表示以下二元假设检验问题:

$$H_0: \begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{n} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{n}_k, k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (1)$$

$$H_1: \begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{S}\mathbf{a} + \mathbf{n} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{n}_k, k = 1, \dots, K \end{cases}$$

其中  $\mathbf{S} = \text{diag}(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_M)$ ,  $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_{p1}^T, \mathbf{z}_{p2}^T, \dots, \mathbf{z}_{pM}^T]^T$ ,  $\mathbf{z}_k = [\mathbf{z}_{1k}^T, \mathbf{z}_{2k}^T, \dots, \mathbf{z}_{Mk}^T]^T$ ,  $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_{p1}^T, \mathbf{n}_{p2}^T, \dots, \mathbf{n}_{pM}^T]^T$ ,  $\mathbf{n}_k = [\mathbf{n}_{1k}^T, \mathbf{n}_{2k}^T, \dots, \mathbf{n}_{Mk}^T]^T$ ,  $\mathbf{s}_m = [1, e^{j2\pi f_{dm}}, \dots, e^{j2\pi f_{dm}(N_t-1)}]^T \otimes [1, e^{j2\pi f_{sm}}, \dots, e^{j2\pi f_{sm}(N_m-1)}]^T$  为  $N_t N_m \times 1$  维空时导向向量,  $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$ ,  $\mathbf{T}$  表示转置,  $\otimes$  表示 Kronecker 积。

假设各距离单元杂波是独立同分布的复高斯随机变量, 则  $\mathbf{z}$  的协方差矩阵  $\mathbf{R}$  等于  $\mathbf{z}_k$  的协方差矩阵  $\mathbf{R}_k$ , 其第  $(i, j)$  个子矩阵  $\mathbf{R}_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, M$ ) 表示第  $i$  个和第  $j$  个接收雷达单元回波间的互协方差矩阵。因此,  $\mathbf{z}$  和  $\mathbf{z}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 的联合概率密度函数为

$$\left. \begin{aligned} f_0(\mathbf{z}, \mathbf{z}_k | \mathbf{R}, H_0) &= \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{T}_0)] \right\}^{K+1} \\ f_1(\mathbf{z}, \mathbf{z}_k | \mathbf{a}, \mathbf{R}, H_1) &= \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{T}_1)] \right\}^{K+1} \\ \mathbf{T}_0 &= \frac{1}{K+1} \left\{ \mathbf{z}\mathbf{z}^H + \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \right\} \\ \mathbf{T}_1 &= \frac{1}{K+1} \left\{ (\mathbf{z} - \mathbf{S}\mathbf{a})(\mathbf{z} - \mathbf{S}\mathbf{a})^H + \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{H}$  表示共轭转置,  $\|\cdot\|$  和  $\text{tr}(\cdot)$  表示矩阵的行列式和迹。

由以上信号模型可以看出, MIMO 雷达从不同的角度探测目标, 使得各接收雷达单元接收到目标回波强度和 Doppler 频率互不相同。因此, 目标回波强度和目标 Doppler 频率在各接收单元中都出现衰落的概率很小, 正是这种空间分集特性提高了 MIMO 雷达的检测性能。

### 3 MIMO 雷达 GLRT 检测器及其性能分析

本节首先基于式(1)的 MIMO 雷达回波模型, 给出一种恒虚警特性的 MIMO-GLRT 检测器; 然后, 根据杂波协方差矩阵的块对角特性, 提出了一种简化 MIMO-GLRT 检测器。为阐述简洁, 本节只给出结果, 有关推导略。

#### 3.1 MIMO-GLRT 检测器

由式(1)可得未知杂波协方差矩阵  $\mathbf{R}$  和目标回波强度  $\mathbf{a}$  时的广义似然比为

$$\frac{\max_{\mathbf{a}, \mathbf{R}} f_1(\mathbf{z}, \mathbf{z}_k | \mathbf{a}, \mathbf{R}, H_1)}{\max_{\mathbf{R}} f_0(\mathbf{z}, \mathbf{z}_k | \mathbf{R}, H_0)} \begin{matrix} H_1 > \gamma_0 \\ < \gamma_0 \end{matrix} \quad (3)$$

由式(3)可得 MIMO-GLRT 检测器为

$$\frac{\mathbf{z}^H \widehat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{S}^H \widehat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H \widehat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{z}}{1 + \mathbf{z}^H \widehat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{z}} \begin{matrix} H_1 > \eta_0 \\ < \eta_0 \end{matrix} \quad (4)$$

其中  $\widehat{\mathbf{M}} = K \widehat{\mathbf{R}} = \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H$ ,  $\widehat{\mathbf{R}}$  为干扰协方差矩阵估计值。

对式(4)的检测量依次进行白化处理和酉变换可表示为<sup>[12]</sup>

$$\frac{t}{\tau} \begin{matrix} H_1 > \eta_0 \\ < 1 - \eta_0 \end{matrix} \quad (5)$$

其中在  $H_0$  条件下,  $2t$  和  $2\tau$  都是中心 chi 平方分布, 自由度分别为  $2M$  和  $2\left(K - N_t \sum_{m=1}^M N_m + 1\right)$ ; 在  $H_1$  条件下,  $2t$  是自由度为  $2M$  的非中心 chi 平方分布,  $2\tau$  的概率密度函数与  $H_0$  时相同。类似于文献[12]的推导, 可得 MIMO-GLRT 检测器的虚警概率和检测概率分别为

$$P_{fa} = \frac{(1 - \eta_0)^{K - N_t \sum_{m=1}^M N_m + 1}}{\left(K - N_t \sum_{m=1}^M N_m\right)!} \sum_{i=1}^M \frac{\left(K - N_t \sum_{m=1}^M N_m + M - i\right)! \eta_0^{M-i}}{(M - i)!} \quad (6)$$

$$P_d = 1 - \eta_0^{M-1} (1 - \eta_0)^{K - N_t \sum_{m=1}^M N_m + 1} \cdot \sum_{j=1}^{K - N_t \sum_{m=1}^M N_m + 1} \binom{K - N_t \sum_{m=1}^M N_m + M}{j + M - 1} \left(\frac{\eta_0}{1 - \eta_0}\right)^j \cdot \left[1 - \sum_{i=1}^M A_i \int_0^1 \frac{\rho(1 - \eta_0)}{\rho(1 - \eta_0) + 1/(\lambda_i \sigma_t^2)} p_\rho(\rho) d\rho\right] \quad (7)$$

其中  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$  为矩阵  $\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}$  的  $M$  个特征值,  $A_i = \prod_{m=1, m \neq i}^M \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_m}$ ,  $p_\rho(\rho) = \left\{ K! / \left[ \prod_{m=1}^M (N_t N_m - 1) - 1 \right]! \cdot \left[ K - \sum_{m=1}^M (N_t N_m - 1) \right]! \right\} \left(1 - \rho\right)_{m=1}^M (N_t N_m - 1)^{-1} \rho^{K - \sum_{m=1}^M (N_t N_m - 1)}$ 。

由式(6)可以看出, MIMO-GLRT 的虚警概率与杂波无关, 因此相对于杂波协方差矩阵具有恒虚警特性。当 MIMO 雷达收发共置且各接收单元采用相同阵列时, 各导向向量  $\mathbf{s}_m$  相同, 此时, 若  $M = 2$ , 式(6)和式(7)与文献[12]中式(19)

和式(B.16)一致。

### 3.2 简化 MIMO-GLRT 检测器

由式(4)可以看出 MIMO-GLRT 检测器有两个缺陷: 其一是需要估计杂波协方差矩阵  $\mathbf{R}$ , 这就要求 IID 参考距离单元的数目应大于 MIMO 雷达数据维数的两倍<sup>[9]</sup>, 而在雷达的实际工作环境中, 一般很难获得如此多的 IID 参考单元。其二是当  $M$  很大时, 将无法实时对  $\hat{\mathbf{R}}$  求逆。考虑到 MIMO 雷达各接收单元数据互不相关<sup>[14]</sup>, 因此其协方差矩阵  $\mathbf{R}$  具有块对角特性, 基于该特性本节给出一种简化 MIMO-GLRT 检测器, 降低对 IID 参考单元数目的要求, 同时大幅度减小矩阵求逆运算量。

当  $\mathbf{R}$  为块对角阵时, 广义似然比可表示为

$$\frac{\prod_{i=1}^M \max_{\mathbf{a}_i, \mathbf{R}_{ii}} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_{ii}\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_{ii}^{-1} \mathbf{T}_{1i})] \right\}^{K+1}}{\prod_{i=1}^M \max_{\mathbf{R}_{ii}} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_{ii}\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_{ii}^{-1} \mathbf{T}_{0i})] \right\}^{K+1}} \stackrel{H_1}{>} \gamma \stackrel{H_0}{<} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{T}_{1i} = \frac{1}{K+1} \left\{ (\mathbf{z}_{pi} - \mathbf{a}_i \mathbf{s}_i)(\mathbf{z}_{pi} - \mathbf{a}_i \mathbf{s}_i)^H + \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{ik} \mathbf{z}_{ik}^H \right\}$ ,

$\mathbf{T}_{0i} = \frac{1}{K+1} \left\{ \mathbf{z}_{pi} \mathbf{z}_{pi}^H + \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{ik} \mathbf{z}_{ik}^H \right\}$ 。由式(8)可得简化 MIMO-GLRT 检测器为

$$\prod_{i=1}^M \left[ 1 - \frac{1}{K} \frac{|\mathbf{z}_{pi}^H \hat{\mathbf{R}}_{ii}^{-1} \mathbf{s}_i|^2}{(\mathbf{s}_i^H \hat{\mathbf{R}}_{ii}^{-1} \mathbf{s}_i) \left( 1 + \mathbf{z}_{pi}^H \hat{\mathbf{R}}_{ii}^{-1} \mathbf{z}_{pi} / K \right)} \right] \stackrel{H_1}{>} \frac{1}{\gamma} \stackrel{H_0}{<} \quad (9)$$

其中  $\hat{\mathbf{R}}_{ii} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{z}_{ik} \mathbf{z}_{ik}^H$ 。比较式(9)和式(4)可以看出: 同 MIMO-GLRT 相比, 简化 MIMO-GLRT 只需对协方差矩阵  $\mathbf{R}$  主对角线上的各个子块  $\hat{\mathbf{R}}_{ii}$  进行操作, 其运算量由  $O(N^3)$  减小到  $O\left(\sum_{m=1}^M (N_t N_m)^3\right)$ 。类似于文献[13]附录的推导, 式(9)亦可表示为

$$\prod_{i=1}^M \left[ 1 + \frac{t_i}{\tau_i} \right] \stackrel{H_1}{>} \gamma \stackrel{H_0}{<} \quad (10)$$

式(10)所示检测器中的各个随机变量在  $H_0$  条件下与杂波无关, 故简化 MIMO-GLRT 检测器相对于杂波协方差矩阵也具有恒虚警特性。在一般情况下很难给出其虚警概率和检测概率的闭合表达式, 只有通过蒙特卡罗仿真的方法进行分析。当  $M=2$  时, 可求得虚警概率和检测概率分别为

$$P_{fa} = \begin{cases} \gamma^{-(K-N_t N_1+1)} + (K-N_t N_1+1) \gamma^{-(K-N_t N_2+1)} \ln|\gamma|, & N_1 = N_2 \\ \gamma^{-(K-N_t N_1+1)} + \frac{K-N_t N_1+1}{N_t(N_1-N_2)} [\gamma^{-(K-N_t N_1+1)} - \gamma^{-(K-N_t N_2+1)}], & N_1 \neq N_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$P_d = \int_0^1 \int_0^1 P_d(\rho_1, \rho_2) p_{\rho_1}(\rho_1) p_{\rho_2}(\rho_2) d\rho_1 d\rho_2 \quad (12)$$

其中

$$P_d(\rho_1, \rho_2) = 1 - \gamma^{-\sum_{j_1=1}^{K_1} \binom{K_1}{j_1} \sum_{m_1=0}^{j_1-1} \frac{1}{\rho_1 g_1 \sigma_s^2} \sum_{j_2=1}^{K_2} \binom{K_2}{j_2} \cdot \sum_{m_2=0}^{j_2-1} \frac{1}{\rho_2 g_2 \sigma_s^2} \int_1^\gamma \frac{(\gamma - \xi_2)^{j_1} \xi_2^{K_1+m_1-j_1}}{\left( \xi_2 + \frac{\gamma}{\rho_1 g_1 \sigma_s^2} \right)^{m_1+1}} \cdot \frac{\partial \left[ (\xi_2 - 1)^{j_2} (\xi_2)^{-(K_2-1)} \left( 1 + \frac{\xi_2}{\rho_2 g_2 \sigma_s^2} \right)^{-(m_2+1)} \right]}{\partial \xi_2} d\xi_2 \quad (13)$$

$$p_{\rho_i}(\rho_i) = \frac{K!}{(N_t N_i - 2)! (K - N_t N_i + 1)!} (1 - \rho_i)^{N_t N_i - 2} \cdot \rho_i^{K - N_t N_i + 1}, \quad 0 < \rho_i < 1 \quad (14)$$

$$K_i = K - N_t N_i + 1, \quad g_i = \mathbf{s}_i^H \mathbf{R}_{ii}^{-1} \mathbf{s}_i \quad (i=1, 2) \quad (15)$$

## 4 计算机仿真

在理论推导的基础上, 本节通过计算机仿真模拟比较两种 MIMO 雷达 GLRT 检测器的性能, 并分析 MIMO 雷达空间分集特性对目标检测性能的改善。在数值仿真中, MIMO 雷达的目标回波采用文献[3]所给模型, 空时杂波采用文献[12]所给模型。

仿真参数设置如下: 发射单元一个 CPI 内的脉冲数为 5; 接收单元数为 3, 各接收雷达单元都采用阵元数等于 4 均匀线阵接收回波。杂波峰值的归一化多普勒频率和空间频率分别为  $(-0.3, -0.3)$ 、 $(0, 0)$  以及  $(0.3, 0.3)$ ; 接收雷达 1~3 接收到目标的归一化多普勒频率和空间频率分别为  $(-0.4, 0)$ 、 $(0.1, 0)$  以及  $(0.3, 0.1)$ 。

**仿真 1**  $K=180$ ,  $P_{fa}=10^{-3}$  时, 不同信杂比下, MIMO-GLRT、简化 MIMO-GLRT 以及对接收雷达 2 的数据进行 GLRT 处理三者之间的检测性能比较。

由图 2 可以看出, 在相同参考单元数量  $K$  情况下, MIMO-GLRT 和简化 MIMO-GLRT 的检测性能都明显优于单基地 GLRT, 这是因为目标相对于雷达 2 的空时频率接近杂波的峰值, 单基地 GLRT 在滤除杂波的同时也滤去了目标; 而 MIMO 雷达利用 3 个单元同时探测目标, 此时, 雷达 1 和雷达 3 的目标离杂波峰值较远, 因此将 3 个接收单元的数据进行集中处理, 能充分利用 MIMO 雷达的空间分集特性提高检测性能。

同时, 简化 MIMO-GLRT 只略优于 MIMO-GLRT, 其原因在于参考单元数据  $K$  足够大, 使得两者杂波协方差矩

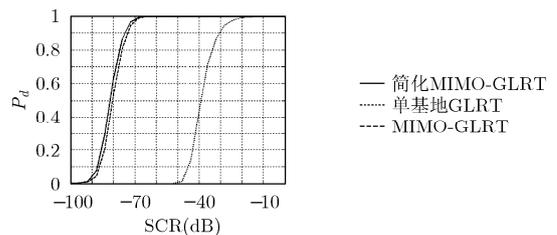


图 2 不同信杂比下 3 种 GLRT 检测器的性能比较

阵估计误差所造成的检测性能损失都很小。仿真2将研究  $K$  较小时, 两者之间的性能比较。

**仿真 2**  $K = 70$ ,  $P_{fa} = 5 \times 10^{-3}, 10^{-3}, 5 \times 10^{-4}$  时, 不同信杂比下, MIMO-GLRT 与简化 MIMO-GLRT 的检测性能比较。

由图 3 可以看出, 在不同虚警概率下, 简化 MIMO-GLRT 性能都优于 MIMO-GLRT 检测器; 在相同参考单元数量  $K$  情况下, 当在  $K$  比较小时, 简化 MIMO-GLRT 的性能明显优于 MIMO-GLRT。其原因如下: 为使估计误差引起的性能损失限制在 3dB 以内, 前者要求参考单元的数目为 40, 而后者则要求参考单元数目为 120。因此, 相比于 MIMO-GLRT, 简化 MIMO-GLRT 更适用于工作在参考单元受限的非均匀杂波环境下。

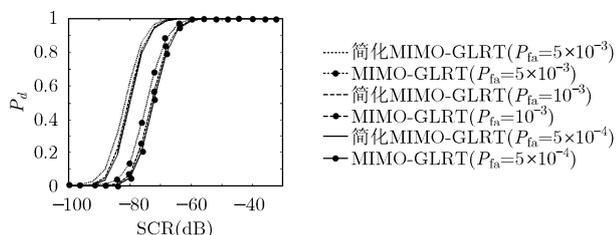


图3 不同信杂比下两种 GLRT 检测器的性能比较

## 5 结论

针对机载 MIMO 雷达在未知统计特性杂波中的目标检测问题, 本文将单基地 GLRT 检测器拓展到机载 MIMO 雷达, 提出相对杂波协方差矩阵具有恒虚警特性的 MIMO-GLRT 和简化 MIMO-GLRT 检测器, 充分利用 MIMO 雷达的空间分集特性提高目标检测性能。相比 MIMO-GLRT, 简化 MIMO-GLRT 降低对参考单元数目的要求和矩阵求逆的运算量, 因此更适用于工作在参考单元受限的非均匀杂波环境下。

## 参考文献

- [1] Bekkerman I and Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(10): 3873-3883.
- [2] Xu L, Li J, and Stoica P. Adaptive techniques for MIMO radar[C]. Proc. 4th IEEE Workshop Sensor Array Multi-Channel Processing, Waltham, MA, Jul, 2006, 2: 576-579.
- [3] Fishler E, Haimovich A, and Blum R, et al. Spatial diversity in radars-Models and detection performance[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [4] Maio A D and Lops M. Design principles of MIMO radar detectors[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 886-898.
- [5] Lehmann N H, Fishler E, and Haimovich A M, et al. Evaluation of transmit diversity in MIMO-radar direction finding[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2007, 55(5): 2215-2225.
- [6] Haimovich A M, Blum R S, and Cimini L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [7] Sheikhi A, Zamani A, and Norouzi. Y. Model-based adaptive target detection in clutter using MIMO radar[C]. Proc.CIE, Shanghai, China, 2006, 1: 57-60.
- [8] Goodman N A and Bruyere D. Optimum and decentralized detection for multistatic airborne radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(2): 806-813.
- [9] Reed I S, Mallett J D, and Brennan E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(6): 853-863.
- [10] Kelly E J. A adaptive detection algorithm[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(1): 115-127.
- [11] Robey F C, Fuhrmann D R, and Kelly E J, et al. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(1): 208-216.
- [12] Park H, Li J, and Wang H. Polarization-space-time domain generalized likelihood ratio detection of radar targets[J]. *Signal Processing*, 1995, 41(2): 153-164.
- [13] Pastina D, Lombardo P, and Bucciarelli T. Adaptive polarimetric target detection with coherent Radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1194-1206.
- [14] Sammartino P F, Baker C J, and Griffiths H D. MIMO radar performance in clutter environment[C]. Proc. CIE, Shanghai, China, 2006: 16-19.

- 王鞠庭: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达波形设计与信号处理。
- 江胜利: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为雷达波形设计与信号处理。
- 何劲: 男, 1980年生, 博士后, 研究方向为阵列信号处理与时空自适应信号处理。
- 刘中: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代信号处理、雷达信号处理、混沌与信息动力学。