

集中式 OFDM-MIMO 雷达自适应检测算法

王鞠庭¹, 钱叶旺¹, 胡文²

(1. 池州学院机电工程学院, 安徽池州 247000;

2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016)

摘要: 针对频率分集条件下, 集中式 OFDM-MIMO 雷达在未知杂波环境中的目标检测问题, 首先分析了 OFDM-MIMO 雷达回波数据模型, 由于 OFDM-MIMO 雷达的频率分集特性, 不同频率通道回波数据相互独立, 在此基础上, 分别基于一步和两步广义最大似然比准则, 给出了集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 和 OFDM-MIMO 雷达 AMF 两种检测器, 并分析了这两种检测器的恒虚警特性。两种检测器有效利用集中式 OFDM-MIMO 雷达频率分集特性, 提升目标检测性能, 同时降低了矩阵求逆维数, 以及参考单元数目的要求, 并且具有恒虚警性能。计算机仿真验证了算法的有效性。

关键词: MIMO 雷达; 频率分集; 自适应检测; 恒虚警

中图分类号: TN958 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2019)03-0299-06

Generalized Likelihood Ratio Detector for Colocated OFDM-MIMO Radar

WANG Juting¹, QIAN Yewang¹, HU Wen²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Chizhou University, Chizhou 247000, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper studies the problem of signal detection in clutter for the colocated OFDM-MIMO radar. With frequency diversity, the data of OFDM-MIMO radar from different frequency channels are uncorrelated each other. Based on this, a one-step and a two-step generalized likelihood ratio test detectors (GLRTD) are firstly proposed which are called GLRT and AMF (adaptive matched filter) respectively. Then, the constant false alarm rate (CFAR) properties of the two proposed detectors are demonstrated. With frequency diversity, target detection performance is improved, also the computational complexity of the two detectors and the secondary range cell numbers for clutter covariance matrix estimation are reduced. The simulation results show the effectiveness of the two detectors.

Key words: MIMO radar; frequency diversity; adaptive detection; constant false alarm rate (CFAR)

0 引言

针对日益严峻的雷达目标探测环境, 在电子技术发展的基础上, 国外学者将通信领域多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 思想引入雷达领域建立起 MIMO 雷达概念。MIMO 雷达不同天线可以发射任意波形, 相比传统雷达

具有更多的自由度, 也因此可以进一步提升目标发现、定位等性能, 受到雷达界广泛关注, 在过去的 10 多年里一直是研究热点之一^[1-5]。

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号具有多个并行正交子载波, Sen 研究了各子载波的自适应调制, 以提高多径环境中雷达对目标的检测性能^[6], 并进一步将 OFDM 信号应用于集中式 MIMO 雷达, 研究了集中式

OFDM-MIMO 雷达低空目标跟踪场景下的波形设计问题^[7]。文献[8-10]研究了分布式 OFDM-MIMO 雷达包络对齐、目标的非相参检测、MTI 处理以及高速目标的检测前跟踪算法。文献[11]研究了分布式 OFDM-MIMO 雷达在非高斯杂波下回波信号参差补偿问题。文献[12]研究了集中式 OFDM-MIMO 雷达对目标的广义似然比检测算法。在研究集中式 OFDM-MIMO 雷达目标探测问题时,通常没有在算法设计阶段考虑多个频率通道的独立性以及对检测算法性能的理论分析。

我们知道,目标和杂波在不同的频段具有不同的散射特性,OFDM-MIMO 雷达通过发射具有一定频率间隔的多频信号探测目标从而获得独立的目标回波,多个独立的频率通道可以获取更多的目标信息,可以提高目标的探测性能^[7,13-14]。相比分布式 OFDM-MIMO 雷达,集中式 OFDM-MIMO 雷达可以避免包络对齐等问题,具有更好的可实现性,因此本文主要对集中式 OFDM-MIMO 雷达展开研究。针对集中式 OFDM-MIMO 雷达在未知杂波中目标检测问题,在给出集中式 OFDM-MIMO 雷达回波数据模型的基础上,考虑集中式 OFDM-MIMO 雷达不同频率通道回波数据的独立性,基于一歩和两步广义最大似然比准则,给出了两种检测器,并分析了其恒虚警性能。两种检测器利用集中式 OFDM-MIMO 雷达频率分集特性,降低了杂波协方差矩阵求逆维数,也因此同时降低了杂波协方差矩阵的估计难度。

1 集中式 OFDM-MIMO 雷达回波模型

如图 1 所示,假设集中式 OFDM-MIMO 雷达由 L 个收发阵元组成一均匀线阵,阵元间距为 d ,第 l 个阵元的位置记为 $(d(l-1), 0, 0)$,其发射信号为 $s_l(t)$,相干处理脉冲数为 N ,脉冲重复周期为 T_{PRI} 。

集中式 OFDM-MIMO 雷达回波同时由 L 个阵元接收,通过对每个阵元的接收回波进行 L 路混频和低通滤波,从而获得 L 组阵列回波信号,每组阵列回波信号对应一个频率通道,具有 L 个数

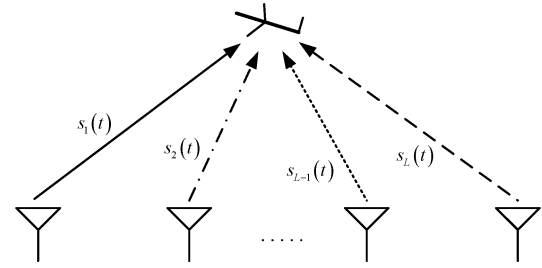


图 1 集中式 OFDM-MIMO 雷达示意图

据。当 Δf 满足式(1)^[14]:

$$\frac{\Delta f \times D}{c} \geq \epsilon \quad (1)$$

不同频率通道回波信号独立,其中 D 为目标尺寸, c 为光速, ϵ 为严格性因子,一般取 0.5。此时,集中式 OFDM-MIMO 雷达可有效实现频率分集增加自由度,从而可以提高雷达性能。

在频率分集条件下,对于第 l 个频率通道,假设有一个目标,其回波强度为 a_l 。该目标所在距离单元回波记为 \mathbf{y}_p^l ,杂波记为 \mathbf{c}_p^l 。共有 K 个参考距离单元,对于第 k 个参考单元,其回波记为 \mathbf{y}_k^l ,杂波记为 \mathbf{c}_k^l 。目标相对雷达角度为 θ ,速度为 v ,则目标的归一化空间频率和多普勒频率分别为

$$f_i^s = \frac{d \times \sin(\theta) \times f_l}{c} \quad \text{和} \quad f_l^d = \frac{2v \times f_l \times T_{\text{PRI}}}{c}$$

则空间导向向量 $\mathbf{a}(f_i^s)$ 和时间导向向量 $\mathbf{b}(f_l^d)$ 分别为

$$\mathbf{a}(f_i^s) = [1, e^{j2\pi f_i^s}, \dots, e^{j2\pi f_i^s(L-1)}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{b}(f_l^d) = [1, e^{j2\pi f_l^d}, \dots, e^{j2\pi f_l^d(N-1)}]^T \quad (3)$$

式中, T 表示转置。因此,第 l 个接收通道的信号为

$$\mathbf{y}_p^l = a_l \cdot \mathbf{a}(f_i^s) \otimes \mathbf{b}(f_l^d) + \mathbf{c}_p^l \quad (4)$$

式中, \otimes 表示 Kronecker 积。

定义如下 $N_1 = L^2 N$ 维列向量:

$$\mathbf{Y}_p = [\mathbf{y}_p^{1T}, \mathbf{y}_p^{2T}, \dots, \mathbf{y}_p^{LT}]^T$$

$$\mathbf{Y}_k = [\mathbf{y}_k^{1T}, \mathbf{y}_k^{2T}, \dots, \mathbf{y}_k^{LT}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_p = [\mathbf{c}_p^{1T}, \mathbf{c}_p^{2T}, \dots, \mathbf{c}_p^{LT}]^T$$

$$\mathbf{C}_k = [\mathbf{c}_k^{1T}, \mathbf{c}_k^{2T}, \dots, \mathbf{c}_k^{LT}]^T$$

得到以下集中式 OFDM-MIMO 雷达目标二元假设检验问题:

$$H_0: \begin{cases} \mathbf{Y}_p = \mathbf{C}_p \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}_k, k=1, \dots, K \end{cases} \quad (6)$$

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

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_L) \\ \mathbf{a} &= [a_1, a_2, \dots, a_L]^T \end{aligned} \quad (7)$$

$s_l = \mathbf{a}(f_l^s) \otimes \mathbf{b}(f_l^d)$, diag 表示以 s_1, s_2, \dots, s_L 为对角元素的对角矩阵。

记各频率通道杂波协方差矩阵 $\mathbf{R}_p = E(\mathbf{C}_p \mathbf{C}_p^H) = \mathbf{R}_k = E(\mathbf{C}_k \mathbf{C}_k^H)$, H 为共轭转置。在频率分集条件下,集中式 OFDM-MIMO 各频率通道杂波 \mathbf{c}_p^l 和 \mathbf{c}_k^l 互相独立,杂波协方差矩阵为块对角矩阵,可表示为

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{R}_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

因此, \mathbf{Y}_p 和 \mathbf{Y}_k 的联合概率密度函数为

$$f_0(\cdot) = \prod_{l=1}^L \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{0l})] \right\}^{K+1} \quad (9)$$

$$f_1(\cdot) = \prod_{l=1}^L \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{1l})] \right\}^{K+1} \quad (10)$$

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{0l} &= \frac{1}{K+1} \left\{ \mathbf{y}_p^l \mathbf{y}_p^{lH} + \sum_{k=1}^K \mathbf{y}_k^l \mathbf{y}_k^{lH} \right\} \\ \mathbf{T}_{1l} &= \frac{1}{K+1} \left\{ (\mathbf{y}_p^l - a_l \mathbf{s}_l) \cdot \right. \\ &\quad \left. (\mathbf{y}_p^l - a_l \mathbf{s}_l)^H + \sum_{k=1}^K \mathbf{y}_k^l \mathbf{y}_k^{lH} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$\|\cdot\|$ 表示矩阵的行列式, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。

由以上回波模型,当集中式 OFDM-MIMO 雷达满足通道独立性条件时,各个通道的目标回波强度不同,杂波也相互独立。由于不同频率通道回波数据的独立性,相比于普通集中式 MIMO 雷达,集中式 OFDM-MIMO 雷达具有新的目标分集特性以及杂波对抗性能。相比于分布式 MIMO 雷达,集中式 OFDM-MIMO 雷达避免了不同通道数据包络对齐等难题,实现难度更低。

2 集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 检测器与 AMF 检测器

本节首先在式(6)所给出的集中式 OFDM-MIMO 雷达回波模型基础上,基于一歩和两歩广义最大似然比准则,给出集中式 OFDM-MIMO 雷

达 GLRT 检测器^[15]和 AMF 检测器^[16],然后分析这两种检测器的恒虚警特性。

2.1 集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 检测器

由一歩广义似然比准则^[15]以及式(6)、式(9)~式(11),集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 检测器可表示为

$$\frac{\prod_{l=1}^L \max_{\mathbf{R}_l, \mathbf{R}_l} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{1l})] \right\}^{K+1}}{\prod_{l=1}^L \max_{\mathbf{R}_l} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{0l})] \right\}^{K+1}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \gamma_0 \quad (12)$$

首先对式(12)分子、分母分别关于 \mathbf{R}_l 最大化:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{R}_l} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{1l})] \right\} &= \\ \left\{ \frac{1}{(\pi e)^{NL} \mathbf{T}_{1l}} \right\}^{K+1}, l=1, 2, \dots, L & \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{R}_l} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{0l})] \right\} &= \\ \left\{ \frac{1}{(\pi e)^{NL} \mathbf{T}_{0l}} \right\}^{K+1}, l=1, 2, \dots, L & \end{aligned}$$

进而可以将式(12)表示为

$$\frac{\prod_{l=1}^L \frac{1 + \frac{1}{K} \mathbf{y}_p^{lH} \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{y}_p^l}{\min_{a_l} \left[1 + \frac{1}{K} (\mathbf{y}_p^l - a_l \mathbf{s}_l)^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} (\mathbf{y}_p^l - a_l \mathbf{s}_l) \right]}}{\prod_{l=1}^L} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \gamma \quad (14)$$

式中, $\hat{\mathbf{R}}_l = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{y}_k^l \mathbf{y}_k^{lH}$ 。

进一步对式(14)关于 a_l 最大化,可得 a_l 的最小二乘估计 $\hat{a}_l = (\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l)^{-1} \mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{y}_p^l$,最后将 \hat{a}_l 代入式(14),可得集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 检测器的表达式:

$$\prod_{l=1}^L \left[1 - \frac{1}{K} \frac{|\mathbf{y}_p^{lH} \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l|^2}{(\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l) (1 + \mathbf{y}_p^{lH} \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{y}_p^l / K)} \right] \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \gamma \quad (15)$$

2.2 集中式 OFDM-MIMO 雷达 AMF 检测器

由两歩广义似然比准则^[16],以及式(6)、式(9)~式(11),首先假设杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_l 已知,可以将集中式 OFDM-MIMO 雷达 AMF 检测器表示为

$$\prod_{l=1}^L \max_{a_l} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{l'})]} \right\}_{H_1}^{K+1} \left\{ \frac{1}{\|\pi \mathbf{R}_l\|} \exp[-\text{tr}(\mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{T}_{0l})]} \right\}_{H_0}^{\gamma_0} \quad (16)$$

对式(16)关于 a_l 最大化,得到 a_l 的最小二乘估计为 $\hat{a}_l = (\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l)^{-1} \mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{y}_l'$,进而式(16)可表示为

$$\sum_{l=1}^L \frac{|\mathbf{y}_l'^H \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{s}_l|^2}{\mathbf{s}_l^H \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{s}_l} \Bigg|_{H_0}^{H_1} \gamma_1 \quad (17)$$

最后,用 \mathbf{R}_l 的估计值 $\hat{\mathbf{R}}_l$ 代替式(17)中的 \mathbf{R}_l ,得到集中式 OFDM-MIMO 雷达 AMF 检测器的表达式:

$$\sum_{l=1}^L \frac{|\mathbf{y}_l'^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l|^2}{\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l} \Bigg|_{H_0}^{H_1} \gamma_1 \quad (18)$$

2.3 两种检测器恒虚警性能分析

为了方便研究两个检测器的统计特性,首先将式(15)和式(18)分别改写成式(19)和式(20):

$$\prod_{l=1}^L \left[\frac{E_l + KF_l}{E_l + KF_l + E_l F_l} \right]_{H_0}^{H_1} \frac{1}{\gamma} \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L E_l \Bigg|_{H_0}^{H_1} \gamma_1 \quad (20)$$

式中,

$$E_l = \frac{|\mathbf{y}_l'^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l|^2}{\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l} \quad (21)$$

$$F_l = \frac{\frac{|\mathbf{y}_l'^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l|^2}{\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l}}{\mathbf{y}_l'^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{y}_l' - \frac{|\mathbf{y}_l'^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l|^2}{\mathbf{s}_l^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \mathbf{s}_l}} \quad (22)$$

由文献[17]可知, E_l 和 F_l 的统计特性分别与式(23)和式(24)两式等效:

$$\frac{1}{h_{1l}^2} \left\| n_l + \frac{g_l}{h_{2l}} h_{3l} \right\|^2 \quad (23)$$

$$\frac{1}{h_{1l}^2} \left\| n_l \frac{h_{2l}}{g_l} + h_{3l} \right\|^2 \quad (24)$$

其中,在 H_0 假设下 h_{3l} 和 n_l 服从复高斯分布, g_l^2 , h_{1l}^2 和 h_{2l}^2 服从参数分别为 $LN-1$, $K-LN+1$, $K-LN+2$ 的中心 chi 平方分布,即 $h_{3l} \sim CN[0,1]$, $n_l \sim CN[0,1]$, $g_l^2 \sim \chi_{L-1}^2[0]$, $h_{1l}^2 \sim \chi_{K-L+1}^2[0]$, $h_{2l}^2 \sim \chi_{K-L+2}^2[0]$.

由以上可知,式(23)和式(24)与频率通道数 L ,脉冲数 N 以及参考单元数 K 有关,而与杂波协

方差矩阵 \mathbf{R}_l 无关。因此式(15)和式(18)两种集中式 OFDM-MIMO 雷达检测器相对杂波协方差矩阵具有恒虚警特性。

另外,两种集中式 OFDM-MIMO 雷达检测器在设计阶段,考虑不同频率通道回波数据独立,进而可以对 \mathbf{R}_l 分别进行估计和求逆运算。这带来两个好处:1) 3 dB 参考单元数目要求由 $2L^2N$ 降低为 $2LN$;2) 矩阵求逆运算复杂度由 $O(L^6N^3)$ 降低到 $O(L^4N^3)$ 。

3 计算机仿真

本节通过计算机仿真,分析研究不同频率分集以及参考单元数量条件下,集中式 OFDM-MIMO 雷达两种检测器的目标检测性能。

在数值仿真中,不同频率通道的目标回波强度为服从零均值,方差为 1 的复高斯变量,起伏特性满足第一类起伏模型,即 $\mathbf{a} \sim CN(\mathbf{0}, \sigma_a^2 \mathbf{I})$ 。杂波采用文献[18]所给模型,假设静止雷达平台,各频率通道的杂波谱相同,则可由式(25)表示:

$$p_c(f_l^d, f_l^s) = \sum_{i=1}^I \frac{\sigma_{ci}^2}{2\pi\sigma_{f^d}\sigma_{f^s}} \exp\left\{-\left[\frac{f_l^{d2}}{2\sigma_{f^d}^2} + \frac{(f_l^d - f_{csi})^2}{2\sigma_{f^s}^2}\right]\right\} \quad (25)$$

式中, σ_{f^d} 为杂波多普勒谱峰宽度, σ_{f^s} 为杂波角度谱峰宽度, f_{csi} 为角度谱峰的中心频率, σ_{ci}^2 为各杂波峰的功率, I 为杂波峰个数。各频率通道的杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_l 可表示为

$$\mathbf{R}_l = \mathbf{R}_l^d \otimes \mathbf{R}_l^s \quad (26)$$

式中, $\mathbf{R}_l^d(m, j) = \exp[-2(\pi\sigma_{f^d}(m-j))^2]$, $\mathbf{R}_l^s(m, j) = \sum_{i=1}^I \sigma_{ci}^2 \exp[-2(\pi\sigma_{f^d}(m-j))^2 + j2\pi(m-j)f_{csi}]$ 。

各频率通道的信杂比 SCR 定义为

$$SCR = \sigma_a^2 \mathbf{s}_l^H \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{s}_l \quad (27)$$

OFDM-MIMO 雷达阵元间距为 $d=0.15$ m, $f_0=1$ GHz, $\Delta f=100$ MHz, 阵元间距为 $d=0.15$ m。相干脉冲数 $N=5$, 目标相对雷达速度 $v=150$ m/s, $T_{PRI}=0.25$ ms, 目标相对雷达的方位角度 $\theta=30^\circ$ 。各频率分集通道的杂波谱相同,杂波峰个数 $I=3$, f_{csi} 分别为 $-0.3, 0, 0.3$, $\sigma_{f^d}=0.01$, $\sigma_{f^s}=0.025$ 。

仿真 1: 发射和接收阵元数为 4, $P_{fa}=10^{-4}$

时,不同信杂比不同参考数量情况下,集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 检测器和 AMF 检测器的性能。

由图 2 和图 3 可以看出,随着参考单元数量的提升,两种集中式 OFDM-MIMO 雷达检测器的性能都不断提高。我们知道,杂波协方差矩阵估计误差引起的性能损失小于 3 dB,要求参考单元数 K 至少为矩阵维数的两倍。在本仿真实验中,集中式 OFDM-MIMO 雷达总数据维数为 80,每个频率通道数据维数为 20,因此要求 3 dB 参考单元数目 $K \geq 40$ 。从两图还能看出, K 从 30 到 40 的性能提升大于 K 从 40 到 50 的性能提升。两种检测器利用 OFDM-MIMO 雷达通道独立性,降低了对参考单元数量 K 的要求,即降低了杂波协方差矩阵估计难度,也同时降低了检测器运算量,提高了实用性。另外,对比图 2 和图 3,集中式 OFDM-MIMO 的 GLRT 检测器性能要略优于 AMF 检测器性能。同时也应指出,对比式(15)和式(18),式(15)的运算量略大于式(18)的运算量,并且 AMF

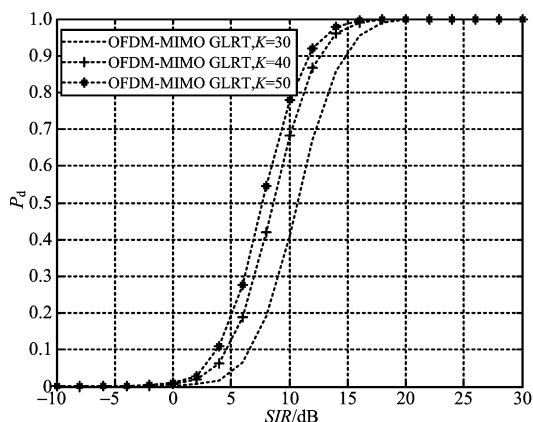


图 2 不同参考单元数量 GLRT 检测器的性能比较

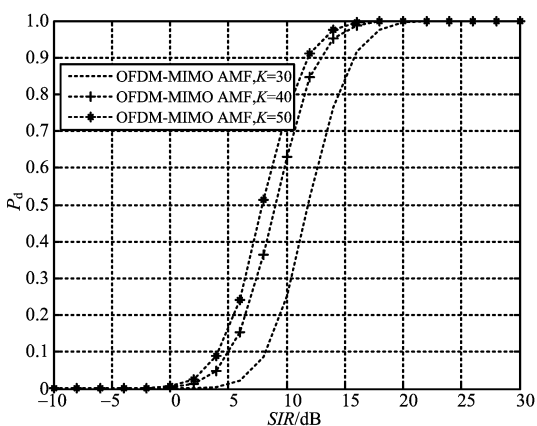


图 3 不同参考单元数量 AMF 检测器的性能比较

检测器更适用于非均匀杂波环境。

仿真 2: $P_{fa} = 10^{-4}$ 时,不同发射和接收单元数量,即不同频率通道数量条件下,集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 检测器和 AMF 检测器的性能。

由图 4 和图 5 可以看出,随着频率通道数量的增多,两种集中式 OFDM-MIMO 雷达检测器的性能不断提升。这是由于目标 RCS 的闪烁,导致雷达回波信杂比(SCR)波动,不同频率通道获得具有不同 SCR 的回波,两种集中式 OFDM-MIMO 雷达检测器综合利用不同频率通道信息,抑制 SCR 波动,从而提升检测性能,并且频率通道数越多,SCR 波动抑制能力越强,检测性能也因此得以提高。

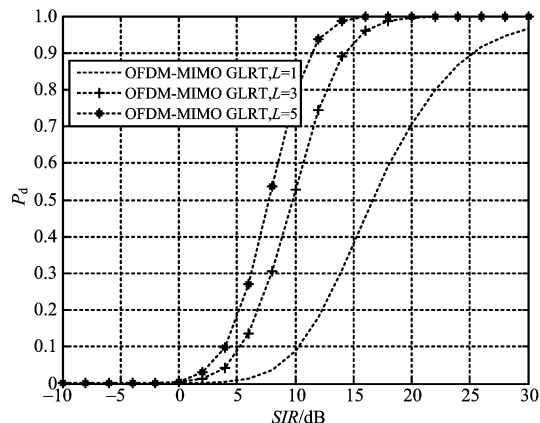


图 4 不同频率通道数 GLRT 检测器的性能比较

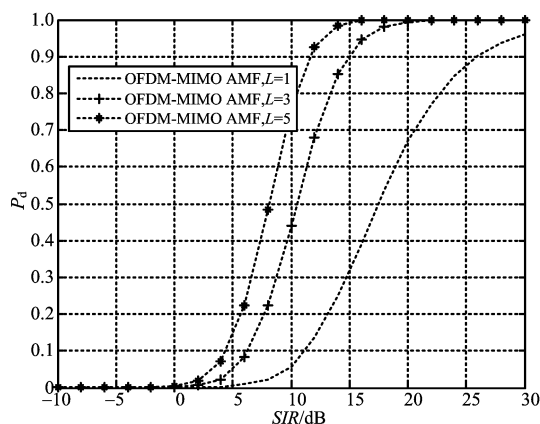


图 5 不同频率通道数 AMF 检测器的性能比较

4 结束语

频率分集条件下,集中式 OFDM-MIMO 雷达具有目标分集性能,新的杂波特性,同时避免了分

布式雷达包络对齐等难题。本文针对集中式 OFDM-MIMO 雷达在未知杂波中目标检测问题, 基于一步和两步广义最大似然比准则, 给出了集中式 OFDM-MIMO 雷达 GLRT 和 AMF 两种检测器。两种检测器能有效利用集中式 OFDM-MIMO 雷达频率分集, 抑制 SCR 波动, 提升目标检测性能。同时, 两种检测器相对杂波协方差矩阵, 具有恒虚警特性, 并基于杂波频率通道独立特性, 降低了算法复杂度, 也降低了参考单元数目要求, 具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] LI Jian, STOICA P. MIMO Radar with Colocated Antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5):106-114.
- [2] 陈诚, 李洪涛, 朱晓华, 等. 干扰背景下 MIMO 雷达部分相关信号设计[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2):442-449.
- [3] 冯涵哲, 严俊坤, 刘宏伟. 一种用于多目标定位的 MIMO 雷达快速功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12):3219-3223.
- [4] 唐波, 张玉, 张浩. 基于交替投影的 MIMO 雷达信号盲分离算法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(9):2092-2097. TANG Bo, ZHANG Yu, ZHANG Hao. Blind Separation of MIMO Radar Signals Based on Alternating Projection [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(9):2092-2097. (in Chinese)
- [5] 李小波, 张正言, 王珽, 等. 双基地 MIMO 雷达相干目标的角度快速估计算法[J]. 信号处理, 2016, 32(3):370-377.
- [6] SEN S, NEHORAI A. Adaptive OFDM Radar for Target Detection in Multipath Scenarios [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2011, 59(1):78-90.
- [7] SEN S, NEHORAI A. OFDM MIMO Radar with Mutual-Information Waveform Design for Low-Grazing Angle Tracking [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2010, 58(6):3152-3162.
- [8] 谷文堃, 王党卫, 马晓岩, 等. 分布式 OFDM-MIMO 雷达非相参积累目标检测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(10):2266-2271.
- [9] 谷文堃, 王党卫, 马晓岩. 分布式 OFDM-MIMO 雷达 MTI 处理[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8):1794-1799.
- [10] 谷文堃, 王党卫, 郑岱堃, 等. 分布式 OFDM-MIMO 雷达高速微弱目标多帧检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2):65-69.
- GU Wenkun, WANG Dangwei, ZHENG Daikun, et al. High-Speed Weak Target Multiframe Detection Using Distributed OFDM-MIMO Phased Radar [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(2):65-69. (in Chinese)
- [11] 周豪, 胡国平, 师俊朋, 等. OFDM-MIMO 雷达低空目标探测性能研究[J]. 电波科学学报, 2016, 31(5):988-995.
- [12] 袁海锋, 江朝抒. OFDM-MIMO 雷达体制的多径抑制性能分析[J]. 信号处理, 2012, 28(7):1000-1005.
- [13] 兰星, 李伟, 王兴亮, 等. 频率分集 MIMO 雷达信号优化设计[J]. 信号处理, 2015, 31(8):1029-1034.
- [14] FANTE R L. Multifrequency Detection of a Slowly Fluctuating Target [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1):495-497.
- [15] KELLY E J. An Adaptive Detection Algorithm [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(2):115-127.
- [16] ROBEY F C, FUHRMANN D R, KELLY E J, et al. A CFAR Adaptive Matched Filter Detector [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(1):208-216.
- [17] KRAUT S, SCHARF L L, MCWHORTER L T. Adaptive Subspace Detectors [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001, 49(1):1-16.
- [18] PARK H, LI Jian, WANG Hong. Polarization-Space-Time Domain Generalized Likelihood Ratio Detection of Radar Targets [J]. Signal Processing, 1995, 41(2):153-164.

作者简介:



王鞠庭 男, 1983 年生, 安徽池州人, 池州学院机电工程学院高级工程师, 主要研究方向为 MIMO 雷达系统与 MIMO 雷达信号处理。
E-mail: jtwang767@sina.com

钱叶旺 男, 1971 年生, 安徽安庆人, 池州学院机电工程学院副教授, 主要研究方向为 OFDM 与 MIMO 信号处理。

胡文 男, 1979 年生, 江西南昌人, 南京航空航天大学电子信息工程学院副教授, 主要研究方向为雷达信号处理与雷达系统。