

分布式MIMO雷达参数估计与目标检测性能研究

马 鹏¹, 王石泉², 赵 飞¹

¹陆军装甲兵学院作战保障系战斗支援教研室, 安徽 蚌埠

²陆军装甲兵学院教学科研处, 安徽 蚌埠

收稿日期: 2021年3月8日; 录用日期: 2021年10月19日; 发布日期: 2021年10月26日

摘 要

本文针对不同的目标模型对分布式MIMO雷达工作模式进行了相干处理和非相干处理的分类, 推导出参数估计器与目标检测概率的最终表达式, 论证了不同的布站方式以及收发站数对参数估计和目标检测性能的影响, 支撑了分布式MIMO雷达相关理论的研究。仿真表明布站方式会较大影响参数估计与复杂目标检测的精度, 并与传统相控阵雷达进行对比, 证明了文章结论的有效性。

关键词

分布式, MIMO雷达, 相干检测, 非相干检测, 参数估计

Parameter Estimation and Target Detection for Distributed MIMO Radar

Peng Ma¹, Shiquan Wang², Fei Zhao¹

¹Department of Combat Support, Research Section of Battle Assist, Army Armored Force Institute, Bengbu Anhui

²Section of Teaching and Research, Army Armored Force Institute, Bengbu Anhui

Received: Mar. 8th, 2021; accepted: Oct. 19th, 2021; published: Oct. 26th, 2021

Abstract

Corresponding MIMO radar signal models are established according to the modality of signal processing in parameter estimation and detection, based on which the working patterns of MIMO radar can be classified as coherent processing and non-coherent processing. On this foundation, the performances of estimation and detection are analyzed in detail, primarily focusing on the differ-

ence of two models, which support the conclusion of the rule for configuring transmitters and receiver is provided based on the analysis of effect to performance. The simulation results show the effectiveness of the proposed algorithms by quantitatively analyzing the main factors affecting the capability of forensics.

Keywords

Distributed Radar, MIMO Radar, Coherent Detecting, Non-Coherent Detecting, Parameter Estimation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为新体制雷达的代表, MIMO (MIMO: Multiple Input Multiple Output) 雷达具有诸多优点, 一直是学术界研究的热点。分布式 MIMO 雷达采用大间距配置, 使雷达对目标的观测经历角度扩展, 可充分利用空间分集增益以提高雷达系统的检测和估计性能[1], 代表了未来分布式雷达系统的发展方向, 具有更大的研究潜力。但是相对于集中式 MIMO 雷达而言, 由于无法直接利用阵列信号处理相关理论, 无疑增加了分布式 MIMO 雷达建模与算法分析的难度[2] [3]。

对于分布式 MIMO 雷达参数估计问题, Lehigh 大学的 R.S. Blum、H. Godrich 以及 Q. He 较早地研究了分布式 MIMO 雷达相干模式的目标定位问题[4], 对克拉美 - 罗界(CRB: Cramer Rao Bound)、最优线性无偏估计量和几何精度因子(GDOP: Geometric Dilution of Precision)进行了分析。J. Li 在此基础上推导分析了非相干模式时速度估计的 CRB, 并给出了参数估计的似然函数[5], 结合最大似然(ML: Maximum Likelihood)估计算法可以实现有效估计, 但是文中在参数估计时为简化模型, 直接匹配时延因子, 这并不够合理。此外, Youssef Fayad 结合速度估计的 CRB, 分析了布站方式对于参数估计性能的影响[6], 张栋和李云成分别通过稀疏重构和非均匀采样实现联合参数估计, 并通过仿真验证了均匀布站为相干模式下速度估计的最优布站形式, 但是并没有从理论上论证结论的有效性和唯一性[7] [8]。目标检测一直都是分布式 MIMO 雷达研究的重点, 对于相关工作模式, 其检测方法与传统雷达基本相同, 难点在于非相干 MIMO 雷达的检测问题。非相干 MIMO 雷达的检测问题面临两大挑战, 一个是目标回波信号的临界相关问题[8], 一个是雷达通道的信噪比失衡问题, 即不同通道中目标回波信号的信噪比不同[9]。黄勇等提出一种 MIMO 雷达融合式 GLRT 检测器[10], 旨在解决含未知参数的高斯杂波背景下的目标检测问题。张新勋等将单基地雷达的 GLRT 检测器应用于机载 MIMO 雷达, 提出了 MIMO-GLRT 检测器[11], 但检测器是建立在未知参数的检验框架, 解析式中需要已知假设参数, 并不符合实际。

本文基于不同的目标模型, 推导出 MIMO 雷达相干处理和非相干处理两种工作模式的数学模型, 分析了非相干与相干目标检测与参数估计的性能, 得出了非均匀布阵时不同的布站方式以及收发站数对性能的影响, 论证了 MIMO 雷达相较于相控阵雷达对复杂目标检测具有一定优势; 且在某一分集自由度时, 非相干可逼近相干参数估计的性能, 并降低了估计器的复杂度。

2. 分布式 MIMO 雷达的信号模型

分布式 MIMO 雷达 - 目标的空间配置, 如图 1 所示:

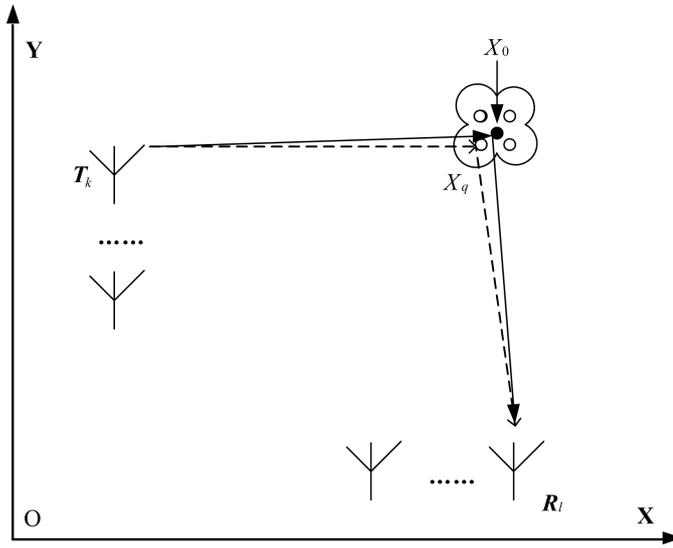


Figure 1. Configuration of distributed MIMO radar and target
图 1. 分布式 MIMO 雷达 - 目标的空间配置图

图中 $T_k = (x_k^t, y_k^t), k = 1, \dots, M$ 表示第 k 部发射站的位置, $R_l = (x_l^r, y_l^r), l = 1, \dots, N$ 表示第 l 部接收站的位置。假设目标由 Q 个散射体组成, 其中第 q 个散射体的位置为 $X_q = (x_q, y_q)$, 目标的中心记为 $X_0 = (x_0, y_0)$ 。第 k 部发射站的发射信号 $\mathbf{s}_k(t)$ 经第 q 个散射体散射后, 被第 l 部接收站接收的回波信号可表示为:

$$\mathbf{r}_{lk}^q(t) = \sqrt{E/M} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}^q) \rho_{lk}^q + \mathbf{n}_{lk}^q(t) \quad (1)$$

式中 $\rho_{lk}^q = \zeta_{lk}^q \exp(-j2\pi f_c(\tau_{lk}^q))$, 且 $\tau_{lk}^q = \left(\sqrt{(x_k^t - x_q)^2 + (y_k^t - y_q)^2} + \sqrt{(x_l^r - x_q)^2 + (y_l^r - y_q)^2} \right) / c$ 表示的是路径传输时延。

由于发射信号满足窄带假设, 因此各收发路径中到 Q 个不同散射体的时延, 均可近似等于到目标中心的时延, 即 $\mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}^q) \approx \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}^0) = \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk})$, 则第 k 部发射站发射的信号 $\mathbf{s}_k(t)$ 经目标散射后, 被第 l 部接收站接收的回波信号可记为:

$$\mathbf{r}_{lk}(t) = \sqrt{E/M} \sigma_{lk} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) + \mathbf{n}_{lk}(t) \quad (2)$$

式中 $\sigma_{lk} = \sum_{q=1}^Q \rho_{lk}^q$ 。

因此, 第 l 部接收站接收到的回波信号表示为所有发射站对应信号的混合, 即:

$$\mathbf{r}_l(t) = \sqrt{E/M} \sum_{k=1}^M \sigma_{lk} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) + \mathbf{n}_l(t) \quad (3)$$

假设各发射波形相互正交, 对接收的回波信号进行匹配滤波、分离后, 可记为:

$$\mathbf{y}_l = \int \mathbf{s}_l^*(t) \mathbf{r}_l(t) dt = \sqrt{E/M} \boldsymbol{\sigma}_l + \mathbf{w}_l \quad (4)$$

式中 $\mathbf{y}_l = [\mathbf{y}_{l1}, \dots, \mathbf{y}_{lM}]^T, \mathbf{s}_l(t) = [\mathbf{s}_1(t - \tau_{l1}), \dots, \mathbf{s}_M(t - \tau_{lM})]^T$, 且 $\boldsymbol{\sigma}_l, \mathbf{w}_l$ 与 \mathbf{y}_l 同型。此处假设收发端保证了理想同步, 因而对不同波形进行匹配滤波时可采用不同的时延, 以使得匹配滤波器的输出在时间上对齐。

将所有接收站的匹配输出表示为矢量形式, 即:

$$\mathbf{y} = H_{1/0} \sqrt{E/M} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{w} \quad (5)$$

式中 $H_{1/0} = 1$ 或 0 ，分别表示目标存在或不存在， $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_N^T]^T$ ， $\boldsymbol{\sigma} = [\boldsymbol{\sigma}_1^T, \boldsymbol{\sigma}_2^T, \dots, \boldsymbol{\sigma}_N^T]^T$ ， $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1^T, \mathbf{w}_2^T, \dots, \mathbf{w}_N^T]^T$ 。假设 $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{w}$ 相互独立， \mathbf{w} 服从零均值复高斯分布，即 $\mathbf{w} \sim CN(0, \sigma_w^2 \mathbf{I})$ ， $\boldsymbol{\sigma}$ 由目标 RCS 特性决定。

由于信号 \mathbf{r} 可表示为 $\mathbf{r} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{MN}]^T$ 的列向量形式，为简化分析，这里省略时延 τ_{ik} ，则相应的信号模型可表示为：

$$\mathbf{r}(t) = \sqrt{E/M} \mathbf{H} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sigma_{1,1} & \cdots & \sigma_{1,M} \\ \vdots & & \vdots \\ \sigma_{N,1} & \cdots & \sigma_{N,M} \end{bmatrix}$ 表示信道矩阵。

因此，结合上式的矢量形式，在对回波信号进行匹配滤波后，且分别以 \mathbf{y} 和 \mathbf{w} 表示滤波后的回波与噪声，则匹配后可表示为：

$$\mathbf{y} = H_{1/0} \sqrt{E/M} \text{vec}(\mathbf{H}) + \mathbf{w} \quad (7)$$

式中 $\text{vec}(\cdot)$ 表示矩阵按列拉直后的列向量。

值得注意的是，对于分布式 MIMO 雷达参数估计的匹配滤波，实际上是在估计过程中实现的，即：在估计中匹配以获得真实的目标参数。对于检测而言，为了简化问题，便于理论分析，假设在检测前已完成了匹配滤波，其信号模型如式(7)所示。

3. 分布式 MIMO 雷达的工作模式

MIMO 雷达的回波在不同条件下可能具有相干或者非相干特性，其空间相干性与目标模型、雷达与目标间距所引起的时延、相移等因素有关。当目标为复杂扩展目标时，雷达收发天线位于不同的目标波束宽度内，对应不同通道的接收回波复振幅也相互独立，即：MIMO 雷达工作在非相干模式；而当目标为简单目标模型或点目标时，所有天线位于同一目标波束宽度内，空间分集条件不再成立，各通道接收的回波复振幅相等，系统只需对各收发站与目标的间距所引起的时延、相移进行补偿，此时各通道的回波具有强相干性，即：MIMO 雷达工作在相干模式。

3.1. MIMO 雷达的参数估计性能

针对分布式 MIMO 雷达的参数估计问题，目前的研究分析了单目标的位置、速度估计性能，推导参数估计的 CRB，并基于 CRB 分析如何优化雷达收发站的配置。

1) 非相干 MIMO 雷达

Q. He 等[4]给出了非相干处理时目标速度估计的信号模型，即：

$$\mathbf{r}_l(t) = \sum_{k=1}^M \sqrt{E/M} \zeta_{lk} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) \exp(j2\pi f_{lk} t) + \mathbf{n}_l(t) \quad (8)$$

式中， $\mathbf{n}_l(t)$ 表示接收端混入的零均值复高斯白噪声，噪声功率为 σ_n^2 ， f_{lk} 为多普勒频移，是目标位置 (x, y) 与速度 (v_x, v_y) 的函数。为便于分析，定义未知参量包括目标速度及散射系数，表示为 $2NM + 2$ 维的矢量 $\boldsymbol{\theta}$ ，即 $\boldsymbol{\theta} = \{v_x, v_y, \zeta_{11R}, \zeta_{11I}, \dots, \zeta_{NMR}, \zeta_{NMI}\}^T$ ，同时定义总回波信号矢量 $\mathbf{r} = [\mathbf{r}_{11}(t), \dots, \mathbf{r}_{NM}(t)]^T$ 。

对于含未知参量 $\boldsymbol{\theta}$ 的回波 \mathbf{r} ，其概率密度函数记为 $f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\theta})$ 。由于参量满足高斯分布的假设，并取对

数后可得到回波信号的似然函数

$$\ln f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\theta}) = -\frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^N \int_T \left| \mathbf{r}_l(t) - \sqrt{E/M} \sum_{k=1}^M \zeta_{lk} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) \exp(j2\pi f_{lk} t) \right|^2 dt + C \quad (9)$$

CRB 是衡量估计均方误差(MSE: Mean Square Error)的标准之一。推导 CRB 前, 需要先得到费歇尔信息矩阵(FIM: Fisher Information Matrix), $J(\boldsymbol{\theta}) = E\left\{ \nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\theta}) [\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\theta})]^T \right\}$, 而 CRB 即为 FIM 的逆, 即 $\mathbf{C}_{CRB} = [J(\boldsymbol{\theta})]^{-1}$ 。

利用链式法则(Chain rule), 通过矩阵和代数运算, 取上式矩阵对角线的前 2×2 维分块矩阵, 即未知参量 $\boldsymbol{\theta}$ 中的速度分量, 则 \mathbf{C}_{CRB}^{vel} 可表示为:

$$\mathbf{C}_{CRB}^{vel} = \left(\mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{U}^H - \mathbf{U} \mathbf{G} \mathbf{L}^{-1} (\mathbf{U} \mathbf{G})^H \right)^{-1} = \begin{bmatrix} CRB_{v_x} & \bullet \\ \bullet & CRB_{v_y} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中矩阵的具体形式由多个参量确定, 例如载波波长、发射站的能量、噪声的功率谱密度、目标反射系数、感兴趣的距离单元、发射信号以及隐含在多普勒函数中的收发站数目和位置等等。

2) 相干 MIMO 雷达

A. De Maio 等[3]研究了相干 MIMO 雷达位置估计的信号模型, 即:

$$\mathbf{r}_l(t) = \sum_{k=1}^M \sqrt{E/M} \zeta_{lk} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) \exp(-j2\pi f_c \tau_{lk}) + \mathbf{n}_l(t) \quad (11)$$

式中 f_c 为发射信号的载频。定义未知参量 $\boldsymbol{\theta}$ 包括位置、散射系数, 即 $\boldsymbol{\theta} = [x, y, \zeta_{re}, \zeta_{im}]^T$ 。由于目标位置可由时延 τ_{lk} 表示, 利用链式法则, FIM 可记为 $J(\boldsymbol{\theta}) = \partial \boldsymbol{\psi} / \partial \boldsymbol{\theta} J(\boldsymbol{\psi}) (\partial \boldsymbol{\psi} / \partial \boldsymbol{\theta})^T$:

对于含未知参量 $\boldsymbol{\psi}$ 的观测信号 \mathbf{r} , 其概率密度函数服从高斯分布, 即 $f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\psi})$ 表示为:

$$f(\mathbf{r}|\boldsymbol{\psi}) \propto \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^N \int_T \left| \mathbf{r}_l(t) - \sqrt{E/M} \sum_{k=1}^M \zeta_{lk} \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) \exp(-j2\pi f_c \tau_{lk}) \right|^2 dt \right\} \quad (12)$$

结合 FIM 的定义, 给出以 $\boldsymbol{\psi}$ 为参量的 FIM 解析形式为:

$$J(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}_{xy} & \mathbf{V} \\ \mathbf{V}^T & \boldsymbol{\Theta}_{\zeta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 $\boldsymbol{\Lambda}_{xy} = 8\pi^2 SNR (f_c^2 + \beta^2) \mathbf{I}$, $\boldsymbol{\Theta}_{\zeta} = SNR \frac{NM}{|\zeta|^2} \mathbf{I}$, $\mathbf{V} = \frac{4\pi f_c SNR}{|\zeta|^2} \begin{bmatrix} -\zeta_{im} & \zeta_{re} \\ \vdots & \vdots \\ -\zeta_{im} & \zeta_{re} \end{bmatrix}$ 。信噪比定义为

$SNR = \left| \sqrt{E/M} \zeta \right|^2 / \sigma_n^2$, 有效带宽 $\beta = \int_w f^2 |S(f)|^2 df / \int_w |S(f)|^2 df$, W 为信号带宽。

由于参数估计中只对目标位置参量感兴趣, 表示为 $\mathbf{C}_{CRB}_x = \mathbf{C}_{CRB}(1,1)$, $\mathbf{C}_{CRB}_y = \mathbf{C}_{CRB}(2,2)$, 即: \mathbf{C}_{CRB} 矩阵对角线的前 2×2 分块矩阵元素。

$$\mathbf{C}_{CRB}^{loc} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{CRB}_x & \bullet & \dots \\ \bullet & \mathbf{C}_{CRB}_y & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (14)$$

在加性噪声的问题中, 当 SNR 足够大时, ML 估计的均方误差可近似达到 CRB。ML 估计器可表示为:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ML} = \arg \left\{ \max_{\boldsymbol{\theta}} \left\{ \ln f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\theta}) \right\} \right\} \quad (15)$$

3.2. MIMO 雷达的目标检测性能

分布式 MIMO 雷达的检测与传统雷达检测的根本区别在于：传统的相控阵雷达和组网雷达(netted radar)是通过相干信号处理，最大化相干处理增益来获得较好的检测性能，而分布式 MIMO 雷达主要是通过非相干信号处理，获得空间分集增益来改善目标的检测性能。

1) 非相干 MIMO 雷达

E. Fishler 等[2]给出了非相干检测时的充分统计量为：

$$T = \mathbf{y}^H \mathbf{y} = \sum_{i=1}^{MN} |y_i|^2 \quad (16)$$

式中 y_i 是向量 \mathbf{y} 的第 i 个分量，进一步得到充分统计量的分布特性，即：

$$\begin{cases} H_0 : T \sim \frac{1}{2} \sigma_w^2 \chi_{2MN}^2 \\ H_1 : T \sim \frac{1}{2} \left(\sigma_w^2 + \frac{E}{M} \right) \chi_{2MN}^2 \end{cases} \quad (17)$$

此时虚警概率和检测概率分别表示为：

$$\begin{cases} P_{fa} = P(T \geq \gamma / H_0) = P\left(\chi_{2MN}^2 \geq \frac{2\gamma}{\sigma_w^2} \right) = Q_{\chi_{2MN}^2} \left(\frac{2\gamma}{\sigma_w^2} \right) \\ P_d = P(T \geq \gamma / H_1) = Q_{\chi_{2MN}^2} \left(\frac{2\gamma}{\sigma_w^2 (1 + SNR/M)} \right) \end{cases} \quad (18)$$

式中 $SNR = E/\sigma_w^2$ 表示信噪比形式， γ 表示由虚警概率 P_{fa} 确定的检测门限， χ_{2MN}^2 表示自由度为 $2MN$ 的中心式 χ^2 分布， $P(\cdot)$ 表示概率分布函数， $Q_{\chi_v^2}(x) = \int_x^\infty p(t) dt$ ， $p(t)$ 为 χ_v^2 的概率密度。

2) 相干 MIMO 雷达

假设目标只有一个散射体(点目标)，且各向同性，假设已知目标参数，即对接收的回波信号进行相位补偿，即 $\mathbf{r}_{lk}(t) = \sqrt{E/M} \zeta \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) + \mathbf{n}_{lk}(t)$ ，则第 l 部接收站接收到的回波可表示为：

$$\mathbf{r}_l(t) = \sqrt{E/M} \sum_{k=1}^M \zeta \mathbf{s}_k(t - \tau_{lk}) + \mathbf{n}_l(t) \quad (20)$$

式中 $\rho_{lk} = \zeta \exp(-j2\pi f_c(\tau_{lk}))$ ， $\zeta \sim CN(0,1)$ 。匹配滤波后，接收站输出可写成矢量形式，即：

$$\mathbf{y} = \sqrt{E/M} \zeta \mathbf{1}_{MN \times 1} + \mathbf{w} \quad (21)$$

对上式求对数似然比，进一步简化后得对数似然比，即：

$$\ln \frac{f(\mathbf{y}/H_1)}{f(\mathbf{y}/H_0)} = \eta_0 + \frac{\sqrt{E/M} |\mathbf{y}^H \mathbf{1}_{M \times 1}|^2}{k} \quad (22)$$

式中 η_0 与 k 均为与观测数据无关的常数。设充分统计量为：

$$T = \left| \mathbf{y}^H \mathbf{1}_{MN \times 1} \right|^2 = \left| \sum_{i=1}^{MN} y_i \right|^2 \quad (23)$$

此时分布式 MIMO 雷达的检验统计量是各通道输出相干求和后的能量，则分布特性可记为：

$$\begin{cases} H_0 : T \sim \frac{1}{2} MN \sigma_w^2 \chi_2^2 \\ H_1 : T \sim \frac{1}{2} MN \left(\sigma_w^2 + \frac{E}{M} MN \right) \chi_2^2 \end{cases} \quad (24)$$

虚警概率和检测概率可分别表示为：

$$\begin{cases} P_{fa} = P(T \geq \gamma / H_0) = P\left(\chi_2^2 \geq \frac{2\gamma}{MN \sigma_w^2}\right) = Q_{\chi_2^2}\left(\frac{2\gamma}{MN \sigma_w^2}\right) \\ P_d = P(T \geq \gamma / H_1) = Q_{\chi_2^2}\left(\frac{2\gamma}{\sigma_w^2 MN (1 + N \cdot SNR)}\right) \end{cases} \quad (25)$$

4. 仿真实验与数据分析

仿真中，以发射和接收站数目 $M = 2, N = 4$ 和 $M = 4, N = 6$ 为例。

1) MIMO 雷达非相干、相干处理的参数估计

为简化分析，这里假设收发站与目标的距离均近似相等，即：对任意 l, k ，都有 $R_l = R_k = 7000$ m。在此基础上，系统随机布阵，即 $\varphi^l = [80^\circ, 120^\circ]$ 、 $\varphi^r = [199^\circ, 220^\circ, 245^\circ, 300^\circ]$ 和 $\varphi^l = [110^\circ, 100^\circ, 51^\circ, 79^\circ]$ 、 $\varphi^r = [325^\circ, 60^\circ, 300^\circ, 265^\circ, 115^\circ, 85^\circ]$ 。假设空间有 1 个目标，坐标位置为 (50, 30)m，速度为 (15.5, 97.1)m/s。发射信号为正弦脉冲信号，其数学形式为 $\mathbf{s}_k(t) = e^{j2\pi k \Delta f t} / \sqrt{T}$ ，其中频率增量 $\Delta f = 200$ Hz 以保证正交性，信号时间宽度 $T = 10$ ms，载频 $f_c = 1$ GHz，采样频率 $f_s = 140.625$ kHz。

如图 2 所示，随着天线数增加，参数估计的性能迅速提高，且估计中 Y 方向的效果要优于 X 方向，这是由于布站配置中天线相对于 Y 方向投影的延展更大，因此 Y 方向对估计效果更敏感，参数估计的性能更高。且由于检测器的性能发挥会直接作用于参数估计，因此相对于传统的参数估计值而言，本文算法的估计性能会略微下降，但是更符合实际情况。

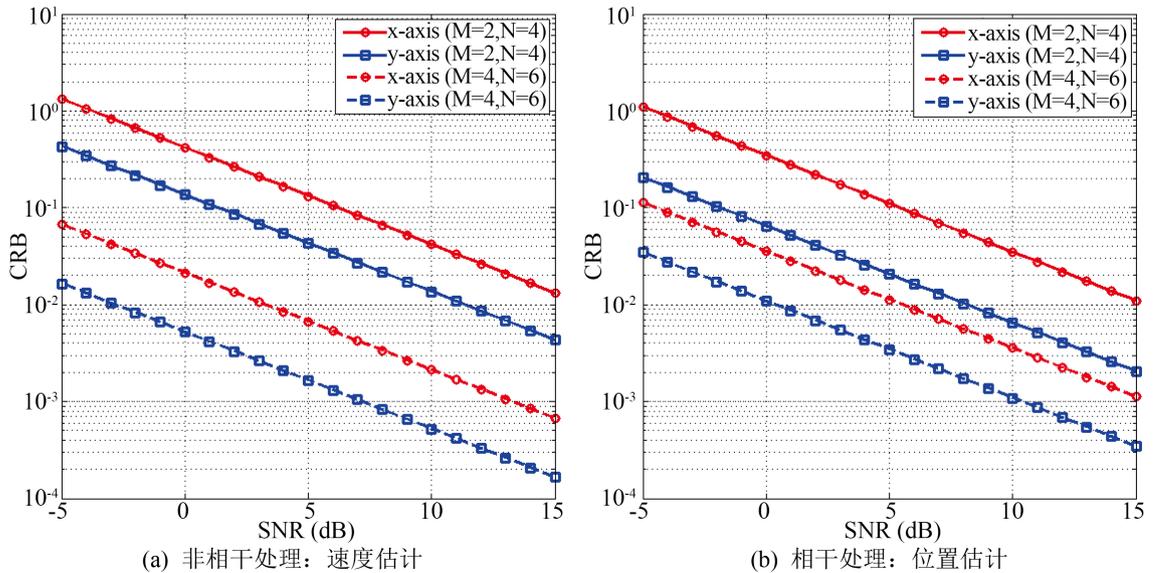


Figure 2. CRB of parameters estimation of distributed MIMO radar
图 2. 分布式 MIMO 雷达参数估计的 CRB 曲线

根据上面的分析, 可得如下结论: 非均匀布阵中, 阵列的布阵方式会影响参数估计的精度, 收发站沿某方向投影所得到的延展越大, 则该方向对应的估计精度越高。

2) MIMO 雷达非相干、相干处理与相控阵雷达的检测性能

这里设虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$, 如图 3 所示。由图 3(a)可以看出, 在高检测概率时(近似 $P_d \geq 0.9$)或高 SNR 时, MIMO 雷达的非相干检测性能优于相控阵雷达, 而在低检测概率时(或低 SNR 时)相控阵雷达的检测性能优于 MIMO 雷达的非相干检测, 这说明在高 SNR 时, 通过空间分集获得的增益优于相干处理增益; 而在低 SNR 时, 相干处理增益比空间分集增益对雷达检测性能的改善更多。

MIMO 雷达的相干模式的检测性能比相控阵的检测性能差, 这是由于在相同的发射功率和回波接收功率条件下, MIMO 雷达采用了波形分集技术, 使得接收端的通道数目增加, 引入了更多的噪声, 使得总 SNR 下降, 因而 MIMO 雷达的相干检测性能变差。分别增加 2 个发射站和 2 个接收站, 重新进行仿真, 检测性能如图 3(b)所示, 上述结论仍然成立。

根据上面的分析, 可得如下结论: 相控阵的检测性能优于 MIMO 雷达的相干检测, 但在高 SNR 时, MIMO 雷达的非相干检测性能要优于相控阵雷达。

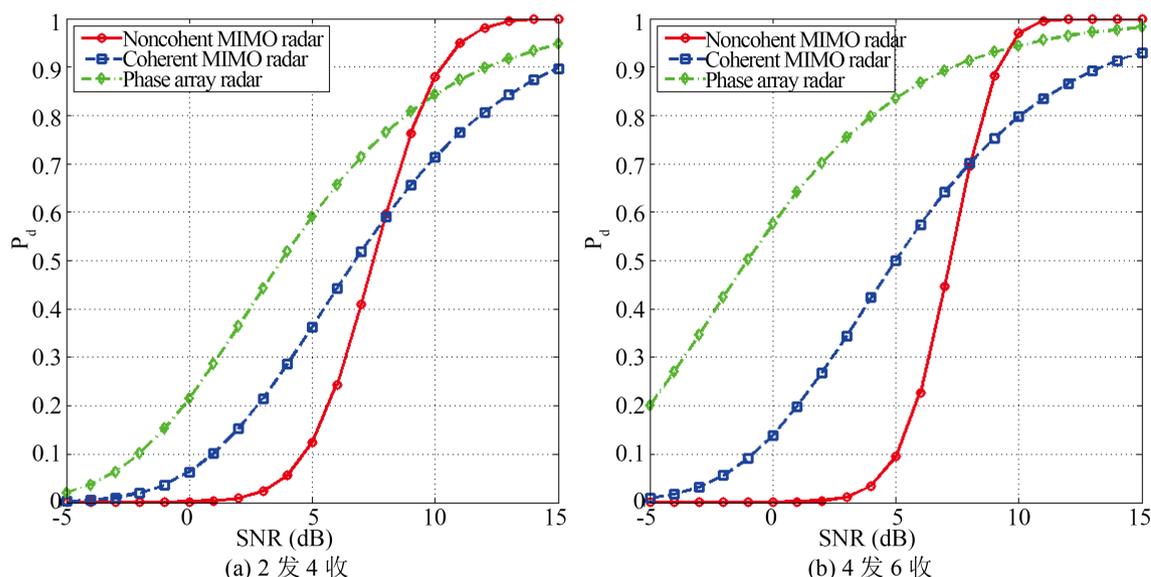


Figure 3. The Detection of distributed MIMO radar and phased array radar
图 3. 分布式 MIMO 雷达和相控阵雷达的检测性能曲线

5. 结束语

本文首先介绍了分布式 MIMO 雷达的信号模型, 包括参数估计与检测的具体信号形式, 并根据不同的目标模型对 MIMO 雷达工作模式进行了分类, 即: 相干处理和非相干处理。构建了相应的数学模型, 并推导出估计器与检测概率的最终表达式, 论证了不同的布站方式以及收发站数对参数估计和目标检测性能的影响。通过仿真表明: 非均匀布站的方式会影响参数估计精度, 收发站沿某方向投影所获得的延展越大, 该方向的估计精度越高; 在高 SNR 时, MIMO 雷达的非相干检测相对于相控阵具有更好的检测性能, 即 MIMO 雷达在检测方面对复杂目标具有一定优势, 这与参数估计的结论相反。

参考文献

- [1] Bliss, D.W. and Forsythe, K.W. (2003) Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Radar and Imaging: Degrees of Freedom

- and Resolution. *Proceeding 37th Asilomar Conference on Signal, System and Computers*, **1**, 54-59.
- [2] Fishler, E., Haimovich, A.M., Blum, R.S., Cimini, L., Chizhik, D. and Valenzuela, R. (2004) Performance of MIMO Radar Systems: Advantages of Angular Diversity. *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, **1-2**, 305-309.
- [3] De Maio, A. and Lops, M. (2007) Design Principles of MIMO Radar Detectors. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **43**, 886-898. <https://doi.org/10.1109/TAES.2007.4383581>
- [4] He, Q., Lehmann, N., Blum R.S. and Haimovich, A.M. (2010) MIMO Radar Moving Target Detection in Homogeneous Clutter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **46**, 1290-1301. <https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5545189>
- [5] Li, J. and Stoica, P. (2009) Concepts and Applications of a MIMO Radar System with Widely Separated Antennas. In: Li, J. and Stoica, P., Eds., *MIMO Radar Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 365-410. <https://doi.org/10.1002/9780470391488>
- [6] Fayad, Y., Wang, C.Y. and Cao, Q.S. (2017) Temporal-Spatial Subspaces Modern Combination Method for 2D-DOA Estimation in MIMO Radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, **28**, 34-39. <https://doi.org/10.21629/JSEE.2017.04.09>
- [7] 张栋, 白新有, 邱彦文, 郑桂妹. 基于联合稀疏重构模型的双基 MIMO 雷达 off-grid 目标参数快速估计[J]. 现代雷达, 2020, 41(11): 30-34.
- [8] 李云成, 崔琛, 龚阳. 基于平行因子分析的时空非均匀采样下双基地 MIMO 雷达目标参数联合估计算法[J]. 电子工程学院学报, 2019(3): 1-7.
- [9] Cui, G. Kong, L. and Yang. X. (2010) Multiple-Input Multiple-Output Radar Detectors Design in Non-Gaussian Clutter. *IET Radar, Sonar & Navigation*, **4**, 724-732. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2009.0056>
- [10] 黄勇, 黄涛, 刘宁波, 陈小龙. 基于均匀性判定规则的统计 MIMO 雷达多通道融合检测技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(1): 101-105+118.
- [11] 张新勋, 周生华, 刘宏伟. 频率分集极化 MIMO 雷达目标检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 11-16+22.