

基于 STFAP 的 MIMO 雷达运动目标参数估计的 CRB 研究

邹博^{*①②} 董臻^① 梁甸农^①

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(陆航研究所 北京 101121)

摘要: 多发多收(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达在目标检测、参数估计等方面具有显著优势。目标参数估计的 CRB 被证明是系统设计和空时自适应处理(STAP)性能分析中的有力工具。该文针对采用频分正交信号的共置天线 MIMO 雷达, 首先建立基于 MIMO 雷达的目标和杂波空-时-频信号模型; 在此基础上, 研究基于空-时-频自适应处理(STFAP)的 MIMO 雷达地面运动目标角度和多普勒参数最大似然估计的克拉美-罗界(CRB); 最后通过 CRB 性能仿真分析验证了 MIMO 雷达 STFAP 有效消除目标检测盲速, 提高目标参数估计精度的优势。

关键词: 多发多收雷达; 空-时-频自适应处理; 克拉美-罗界; 最大似然估计

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)08-1988-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01238

Research on CRB for Moving Target Parameter Estimation in MIMO Radar Based on STFAP

Zou Bo^{①②} Dong Zhen^① Liang Dian-nong^①

^①(School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Institute of Army Aviation, Beijing 101121, China)

Abstract: MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) radar has evident advantages in target detection, parameter estimation, and so on. The Cramer-Rao Bound (CRB) for parameter estimation is proved to be a useful tool for characterizing system design and STAP performance. Therefore, based on MIMO radar with collocated antennas utilizing orthogonal frequency division signal, the space time frequency signal model of target and clutter is given to be used in MIMO radar first. On the basis of the model, the CRB of the ML estimator of ground moving target angle and Doppler for MIMO radar are deduced based on STFAP. Finally, through simulation of CRB performance, it is demonstrated that MIMO radar is effective in eliminating velocity blind zones and improving target parameter estimation accuracy.

Key words: MIMO radar; Space-Time-Frequency Adaptive Processing (STFAP); Cramer-Rao Bound (CRB); Maximum Likelihood (ML) estimation

1 引言

多发多收(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达^[1,2], 综合采用多通道、多波形(多频)技术, 在目标检测、参数估计等方面具有明显优势。MIMO 雷达根据天线布置方式的不同可分为分置天线式^[3]和共置天线式^[4], 本文主要研究共置天线 MIMO 雷达。共置天线 MIMO 雷达发、收天线放置在相对较集中的区域(如同一部相控阵雷达的天线内), 与目标的视角几乎相同, 可以进行相干处理。共置天线 MIMO 雷达的主要特点是通过信号分集, 利用较少的阵列孔径形成更多的虚拟孔径, 将其放置在空间平台(机载或星载), 能够改善对地面运动

目标的探测性能。

实践表明, 无论对于军事应用还是民事应用, 仅仅在自适应抑制杂波的基础上获得运动目标检测结果往往是无法满足需求的, 目标运动参数的估计和正确定位具有更大的应用价值。空-时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)^[5]是一种适用于多通道雷达的理论最优的自适应杂波抑制方法, Ward^[6]基于最优 STAP 处理器, 计算了运动目标角度和多普勒最大似然(Maximum Likelihood, ML)估计的 CRB(Cramer-Rao Bound); Showman 等人^[7]证明了 CRB 是阵列结构和 STAP 性能比较分析中的有力工具。然而以上研究均是针对传统相控阵雷达。MIMO 雷达信号分集的新特点, 要求构建包含空间、时间和波形 3 维数据的自适应处理器, 相应地, 运动目标角度和多普勒估计的 CRB 将基于空

2010-11-15 收到, 2011-03-21 改回

国家自然科学基金(60901071, 60902092)和国家部委基金资助课题

*通信作者: 邹博 zoubodr@yahoo.com.cn

-时-波形自适应处理器。开展 MIMO 雷达动目标参数估值的 CRB 研究是体现 MIMO-STAP 性能和 MIMO 雷达目标参数估计优势的一个重要方面^[8]。

正交波形是 MIMO 雷达信号分集的基础^[9]，MIMO 体制下正交波形可分为两大类：具有相同频带的编码正交信号和频带互不交叠的频分正交信号。与编码正交信号相比，频分正交信号能够保证信号完全正交、且具有缓解动目标检测盲速等问题的优势。因此，本文针对采用频分正交信号的共置天线 MIMO 雷达，基于最优空-时-频自适应处理 (Space-Time-Frequency Adaptive Processing, STFAP) 研究目标角度和多普勒 ML 估值的 CRB，最后通过仿真表明 MIMO 雷达 STFAP 能够有效消除动目标检测盲速，提高目标参数估计精度。

2 信号模型

本文研究基于频分正交信号的共置天线 MIMO 雷达，系统结构如图 1 所示。天线为线阵，轴线方向与平台运动方向相同， N 个子天线相对于原点位置 $\{d_n, n = 0, 1, \dots, N-1 \mid d_0 = 0\}$ ，MIMO-GMTI 采用所有子天线同时发射、同时接收的方式，每个子天线发射不同中心频率脉冲串，对应的中心频率分别为 $\{f_n, n = 0, 1, \dots, N-1\}$ 。则对于方位角 θ_n ，俯仰角 φ_m 的杂波单元，第 k 个发射频率 f_k 对应的空时 2 维导向矢量定义为^[10,11]

$$\mathbf{S}_k^{nm} = \mathbf{S}_{t,k}^{nm} \otimes \mathbf{S}_{s,k}^{nm} \quad (1)$$

式中 \otimes 表示 Kronecker 积。空间导向矢量和时间导向矢量分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{s,k}^{nm} &= \left[e^{j\left(\frac{2\pi d_k f_k}{c} \cos \phi_{nm}\right)}, e^{j\left(\frac{2\pi(d_1+d_k) f_k}{c} \cos \phi_{nm}\right)}, \dots, \right. \\ &\quad \left. e^{j\left(\frac{2\pi(d_{N-1}+d_k) f_k}{c} \cos \phi_{nm}\right)} \right] \\ \mathbf{S}_{t,k}^{nm} &= \left[1, e^{j\left(\frac{4\pi V_a f_k}{c F_r} \cos \phi_{nm}\right)}, \dots, e^{j\left(\frac{4\pi V_a f_k}{c F_r} (M-1) \cos \phi_{nm}\right)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

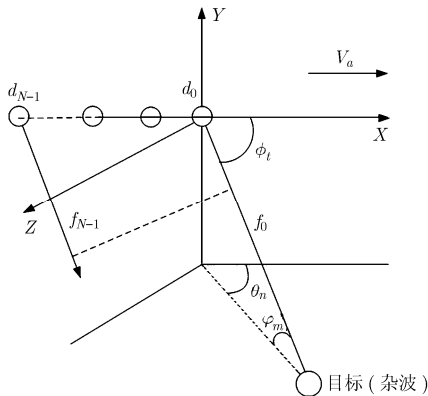


图 1 MIMO 雷达系统结构示意图

其中 c 表示光速， $\cos \phi_{nm} = \cos \theta_n \cos \varphi_m$ ， M 为相干积累脉冲数， F_r 为脉冲重复频率。

将接收到的 N 个不同频率信号对应的空时导向矢量按空间、时间、频率顺序表示成 $N^2 M \times 1$ 维的目标导向矢量。

$$\mathbf{S}_{stf}^{nm} = [\mathbf{S}_0^{nm}, \mathbf{S}_1^{nm}, \dots, \mathbf{S}_{N-1}^{nm}]^T \quad (3)$$

若一个等距离环划分的杂波单元数目为 N_c ，距离模糊数为 N_r ，则一个杂波回波快拍可表示为

$$\mathbf{X}_c^l = \sum_{m=1}^{N_r} \sum_{n=1}^{N_c} \alpha_{nm} \mathbf{S}_{stf}^{nm} + \mathbf{n}_l \quad (4)$$

其中 α_{nm} 为杂波幅度起伏参数， \mathbf{n}_l 为复高斯白噪声。对于入射锥角为 ϕ_t 的运动目标，回波信号可表示为

$$\mathbf{X}_t = \alpha \mathbf{S}^t(\phi_t, V_r) \quad (5)$$

其中 $\alpha = ae^{jb}$ 为目标复幅度， $\mathbf{S}^t = [\mathbf{S}_0^t, \mathbf{S}_1^t, \dots, \mathbf{S}_{N-1}^t]^T$ 为目标空-时-频导向矢量，其中 $\mathbf{S}_k^t(\phi_t, V_r)$ 表示第 k 个频率对应的目标空时 2 维导向矢量 $\mathbf{S}_k^t = \mathbf{S}_{t,k}^t \otimes \mathbf{S}_{s,k}^t$ 。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_{s,k}^t &= \left[e^{j\left(\frac{2\pi d_k f_k}{c} \cos \phi_t\right)}, e^{j\left(\frac{2\pi(d_1+d_k) f_k}{c} \cos \phi_t\right)}, \dots, \right. \\ &\quad \left. e^{j\left(\frac{2\pi(d_{N-1}+d_k) f_k}{c} \cos \phi_t\right)} \right] \\ \mathbf{S}_{t,k}^t &= \left[1, e^{j\left(\frac{4\pi V_r f_k}{c F_r}\right)}, \dots, e^{j\left(\frac{4\pi V_r f_k}{c F_r} (M-1)\right)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则对于目标所在距离环，一个空-时-频回波快拍可表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_t + \mathbf{X}_c^l \quad (7)$$

杂波噪声协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_c = E\{\mathbf{X}_c^l (\mathbf{X}_c^l)^H\} \quad (8)$$

3 目标参数 ML 估值的 CRB

假定杂波噪声协方差矩阵 \mathbf{R}_c 已知，杂波服从多元复高斯分布，则其概率密度函数为^[6]

$$P(\mathbf{X} | \phi_t, V_r, \alpha) = \frac{1}{\pi^{MN^2} |\mathbf{R}_c|} e^{-(\mathbf{X} - \alpha \mathbf{S}^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} (\mathbf{X} - \alpha \mathbf{S}^t)} \quad (9)$$

根据式(9)可知，需要估计的动目标参数包括幅度 a ，相位 b ，入射锥角 ϕ_t 和相对平台径向速度 V_r ，定义未知参数向量：

$$\boldsymbol{\theta} = [a, b, \phi_t, V_r]^T \quad (10)$$

假定每一个杂波快拍数据是统计独立的，则一个杂波快拍的对数似然函数可表示为

$$l(\boldsymbol{\theta}) = -\ln |\pi \mathbf{R}_c| - (\mathbf{X} - \alpha \mathbf{S}^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} (\mathbf{X} - \alpha \mathbf{S}^t) \quad (11)$$

对于给定的回波数据 \mathbf{X} ，目标参数的 ML 估值由下式给出

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} P(\mathbf{X} | \boldsymbol{\theta}) = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} l(\boldsymbol{\theta}) \quad (12)$$

实际中,我们只对目标锥角和径向速度的估计值感兴趣,关于参数 a 和 b , 最大化似然函数, 目标锥角和径向速度的最大似然估计可以根据角度-径向速度扫描得到的最大值确定。

$$[\hat{\phi}_t, \hat{V}_r] = \arg \max_{\phi_t, V_r} \frac{\mathbf{X}^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{S}^t (\mathbf{S}^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{X}}{(\mathbf{S}^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{S}^t} \quad (13)$$

我们知道,任何无偏估计误差的协方差矩阵受 Fisher 信息矩阵 \mathbf{J} 给出的 CRB 限制:

$$E\{(\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta})(\hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta})^T\} \geq \mathbf{J}^{-1} \quad (14)$$

其中 Fisher 信息矩阵 \mathbf{J} 的元素可以通过对对数似然函数求导获得

$$\mathbf{J}_{ij} = -E \left[\frac{\partial^2 \ln(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] = 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial (\alpha \mathbf{S}^t)^H}{\partial \theta_i} \mathbf{R}_c^{-1} \frac{\partial (\alpha \mathbf{S}^t)}{\partial \theta_j} \right\} \quad (15)$$

定义

$$\mathbf{d}_{s,k}^t = \mathbf{S}_{t,k}^t \otimes \mathbf{g}_{s,k}^t, \quad \mathbf{d}_s^t = [\mathbf{d}_{s,0}^t, \mathbf{d}_{s,1}^t, \dots, \mathbf{d}_{s,N-1}^t]^T$$

$$\mathbf{d}_{t,k}^t = \mathbf{g}_{t,k}^t \otimes \mathbf{S}_{s,k}^t, \quad \mathbf{d}_t^t = [\mathbf{d}_{t,0}^t, \mathbf{d}_{t,1}^t, \dots, \mathbf{d}_{t,N-1}^t]^T$$

其中

$$\mathbf{g}_{s,k}^t = \frac{\partial \mathbf{S}_{s,k}^t}{\partial \phi_t} = - \left[j \frac{2\pi d_k f_k}{c} \sin \phi_t \right] e^{j \left(\frac{2\pi d_k f_k}{c} \cos \phi_t \right)}, \dots,$$

$$\left[j \frac{2\pi (d_{N-1} + d_k) f_k}{c} \sin \phi_t \right] e^{j \left(\frac{2\pi (d_{N-1} + d_k) f_k}{c} \cos \phi_t \right)}$$

$$\mathbf{g}_{t,k}^t = \frac{\partial \mathbf{S}_{t,k}^t}{\partial V_r} = \left[0, \left(j \frac{4\pi f_k}{c F_r} \right) e^{j \left(\frac{4\pi V_r f_k}{c F_r} \right)}, \dots, \right.$$

$$\left. \left(j (M-1) \left(\frac{4\pi f_k}{c F_r} \right) \right) e^{j \left((M-1) \left(\frac{4\pi V_r f_k}{c F_r} \right) \right)} \right]$$

则 Fisher 信息矩阵具有下列形式:

$$\mathbf{J} = 2 \begin{bmatrix} \xi & 0 & a\beta_\phi & a\beta_v \\ 0 & a^2\xi & -a^2\gamma_\phi & -a^2\gamma_v \\ a\beta_\phi & -a^2\gamma_\phi & a^2\xi_\phi & a^2\beta_x \\ a\beta_v & -a^2\gamma_v & a^2\beta_x & a^2\xi_v \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中

$$\xi = (\mathbf{S}^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{S}^t, \quad \xi_\phi = (\mathbf{d}_s^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{d}_s^t, \quad \xi_v = (\mathbf{d}_t^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{d}_t^t$$

$$\beta_x + j\gamma_x = (\mathbf{d}_s^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{d}_t^t, \quad \beta_\phi + j\gamma_\phi = (\mathbf{d}_s^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{S}^t$$

$$\beta_v + j\gamma_v = (\mathbf{d}_t^t)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{S}^t$$

我们只对目标锥角和径向速度估计误差的方差感兴趣,因此只需要求出元素 $\mathbf{J}^{-1}(3,3)$ 和 $\mathbf{J}^{-1}(4,4)$ 即可, 根据矩阵分块求逆引理, 得到目标锥角和径向速度估计的 CRB 为

$$\sigma_{\phi_t}^2 \geq \frac{\xi_v \sin^2 \eta_v}{2a^2 (\xi_\phi \xi_v \sin^2 \eta_\phi \sin^2 \eta_v - \delta^2)} \quad (17)$$

$$\sigma_{V_r}^2 \geq \frac{\xi_\phi \sin^2 \eta_\phi}{2a^2 (\xi_\phi \xi_v \sin^2 \eta_\phi \sin^2 \eta_v - \delta^2)} \quad (18)$$

$$\text{其中 } \sin^2 \eta_\phi = 1 - \frac{\beta_\phi^2 + \gamma_\phi^2}{\xi_\phi}, \quad \sin^2 \eta_v = 1 - \frac{\beta_v^2 + \gamma_v^2}{\xi_v},$$

$$\delta = \beta_x - \frac{\beta_v \beta_\phi + \gamma_v \gamma_\phi}{\xi}.$$

4 仿真结果及分析

在理论推导的基础上,本节通过 Monte-Carlo 多次仿真求平均值的方法模拟基于 STFAP 的机载 MIMO 雷达运动目标锥角和径向速度 ML 估值的 CRB, 重点分析信噪比(SNR), 杂噪比(CNR)对锥角和速度估计精度的影响,验证 MIMO 雷达 STFAP 在改善测速盲区、提高检测、估计精度等方面的性能优势。假设 MIMO 雷达由 6 个完全相同的子天线通道构成, 每个通道发射不同中心频率信号, 接收所有通道回波信号, 通过带通滤波分离出与发射信号相对应的回波信号再进行后续处理。系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 MIMO 雷达系统仿真参数

载机高度(km)	10	通道数	6
载机速度(m/s)	200	脉冲数	64
天线孔径(m)	1×0.4	起始中心频率(GHz)	9.6
方位角(°)	90	频率间隔(MHz)	300
俯仰角(°)	60	脉冲重复频率(kHz)	6

仿真 1 假定杂波服从多元复高斯分布, 噪声为高斯白噪声, CNR=30 dB, SNR=10 dB, 基于 STAP 的单发多收(Single-Input Multiple-Output, SIMO)雷达运动目标参数估值的 CRB 分布如图 2 所示。对于侧视线阵, 杂波谱呈直线状分布, 从图中可以看出, 当目标空域频率或多普勒频率靠近杂波谱线时, 目标参数估计精度下降非常迅速, 这是由于 STAP 抑制杂波的同时导致 SNR 严重损失, 相反地, 对于远离杂波谱线的空域/多普勒区域, SNR 几乎不受 STAP 影响, 目标参数估计精度较高; 此外, 由于系统存在速度多普勒模糊, 对于具有相同主值多普勒的角度——径向速度模糊组合位置附近, 目标参数估计精度严重下降。基于 STFAP 的 MIMO 雷达运动目标参数估值的 CRB 分布如图 3 所示, 与 SIMO 雷达相比, 基于频分正交信号的 N

发 N 收 MIMO 雷达系统自由度增加了 N 倍，在提高杂波抑制性能的同时，提高了目标参数估计精度，同时，在脉冲重复频率一定的情况下，不同中心频率对应的速度多普勒模糊主值不同^[12]，STFAP 有效改善了测速盲区的目标检测、估计性能。

仿真 2 令 $CNR=0$ dB，分析 SNR 对参数估计精度的影响，图 4 示出了 SIMO 雷达和 MIMO 雷达目标参数估值 CRB 与目标相对径向速度的关系。由于杂波相对径向速度为 0 m/s，因此，标准偏差的峰值出现在和杂波抑制凹口相同的径向速度上，SNR 越高，CRB 越低，与公式相符，即信号功率 a 越大，CRB 越小。相比于 SIMO 雷达，MIMO 雷达有效消除了盲速产生的估计标准偏差峰值，提高

了估计精度。

仿真 3 令 $SNR=10$ dB，分析 CNR 对参数估计精度的影响，图 5 示出了 SIMO 雷达和 MIMO 雷达在不同 CNR 情况下目标参数估值 CRB 与目标相对径向速度的关系。我们注意到不同 CNR 下，CRB 仅在杂波抑制凹口和多普勒模糊区域有变化，其它区域几乎与 CNR 无关，这是因为最优 STAP 处理器由白化滤波器和匹配滤波器两部分组成，白化滤波器不管 CNR 如何，都将杂波部分抑制到白噪声水平，这时只有杂波抑制凹口深度取决于 CNR ，所以 CRB 峰值取决于 CNR ，而平均值几乎与 CNR 无关。同样地，基于 STFAP 的 MIMO 雷达参数估计消除了盲速影响，提高了估计精度。

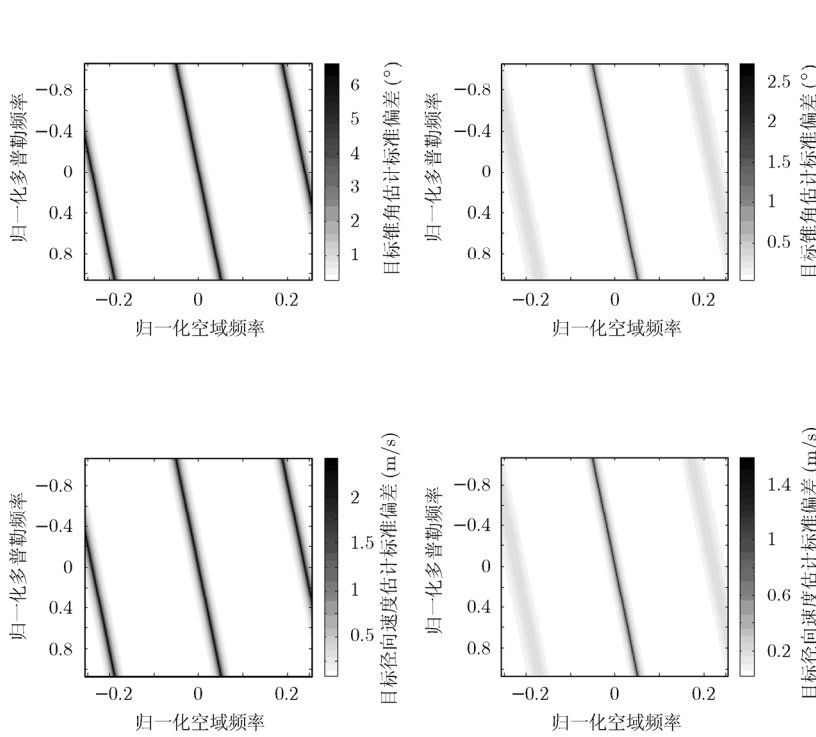


图 2 SIMO 雷达目标参数估值的标准偏差

图 3 MIMO 雷达目标参数估值的标准偏差

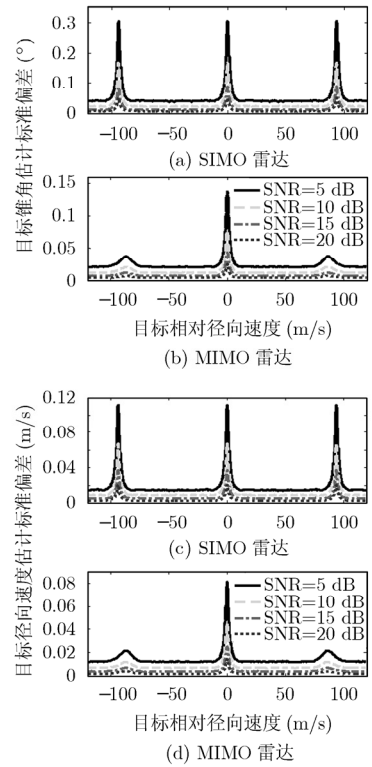


图 4 SNR 对参数估值的影响

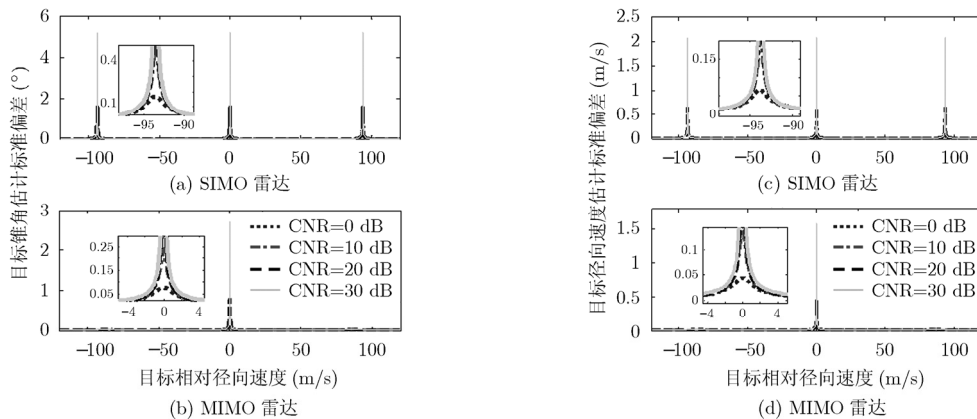


图 5 CNR 对参数估值的影响

5 结束语

本文在建立目标和杂波空-时-频信号模型的基础上, 推导了基于 STFAP 的 MIMO 雷达运动目标参数的 ML 估值的 CRB, 仿真结果表明基于频分正交信号的 MIMO 雷达能够有效改善测速盲区的目标检测、估计性能, 提高参数估计精度, 获得良好的目标估计值。CRB 不仅取决于各种环境参数, 如 SNR, CNR 等, 还对不同系统参数具有依从性, 通过对 CRB 的分析能够指导系统设计, 提高系统性能, 将是下一步需要重点研究的工作。

参 考 文 献

- [1] Fishler E, Haimovich A, Blum R, *et al.* MIMO radar: an idea whose time has come[C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, April 26-29, 2004: 71-78.
- [2] Li Jian and Stoica P. MIMO Radar Signal Processing[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., Publication, 2009: 1-4.
- [3] 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.
- [4] Li Jian and Stoica P. MIMO radar with colocated antennas: review of some recent work[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.
- [5] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2002: 12-20.
- [6] Ward J. Cramer-Rao bounds for target angle and doppler estimation with space-time adaptive processing radar[C]. Proc. 29th ASILOMAR Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, October 30-November 2, 1995: 1198-1203.
- [7] Showman G A, Melvin W L, and Zywicki D J. Application of the Cramer-Rao lower bound for bearing estimation to STAP performance studies[C]. Proceedings of the IEEE 2004 Radar Conference, Philadelphia, USA, April 26-29, 2004: 402-407.
- [8] 王鞠庭, 江胜利, 刘中. 复合高斯杂波中 MIMO 雷达 DOA 估计的克拉美-罗下限[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 786-789.
- Wang Ju-ting, Jiang Sheng-li, and Liu Zhong. Cramer-Rao bounds of DOA estimation for MIMO radars in compound-gaussian clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 786-789.
- [9] Rabideau D J. Adaptive MIMO radar waveforms. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Rome, Italy, May 26-30, 2008: 1-6.
- [10] Chen Chun-yang and Vaidyanathan P P. MIMO radar space-time adaptive processing using prolate spheroidal wave functions[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(2): 623-635.
- [11] Zeng Jian-kui, He Zi-shu, and Liu Bo. Adaptive space-time-waveform processing for MIMO radar[C]. International Conference on Communications, Circuits and Systems, July 11, 2007: 641-643.
- [12] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 多载频 MIMO 雷达解速度模糊及综合处理方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(7): 1696-1700.
- Qin Guo-dong, Chen Bai-xiao, Chen Duo-fang, *et al.* Velocity ambiguity resolution and synthesis processing in multi-frequency MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(7): 1696-1700.

邹 博: 男, 1982 年生, 博士生, 从事天基 MIMO 雷达系统和信号处理等方面的研究工作。

董 臻: 男, 1973 年生, 副教授, 硕士生导师, 从事 SAR 成像与检测等方面的研究工作。

梁甸农: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事超宽带雷达系统理论及自适应信号处理、现代谱估计等研究工作。