

MIMO 与 MISO 雷达定位精度分析

晁淑媛* 陈伯孝 杨明磊 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 在某些应用中需要使小型机动接收平台(飞机或舰船)对目标进行定位, 该文利用基站阵列辅助小型机动平台定位目标, 可构成多输入多输出(MIMO)和多输入单输出(MISO)两种工作模式。文中建立了几何模型, 并分别在这两种模式下推导了目标相对定位精度的几何稀释(GDOP)的计算公式, 分析了两种模式下影响 GDOP 的各种因素。仿真结果证明, MIMO 模式下, 目标的相对定位精度与目标方位角和小型机动平台位置均无关; 阵列天线数目较大或小型机动平台离目标较远时, MIMO 模式的定位精度高于 MISO 模式; 当阵列天线数目较小且小型机动平台离目标较近时, MISO 模式的定位精度高于 MIMO 模式。

关键词: 目标定位; 多输入多输出; 多输入单输出; 定位精度的几何稀释

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0060-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00296

Study of Localization of MIMO and MISO Radars

Chao Shu-yuan Chen Bai-xiao Yang Ming-lei Zhang Shou-hong

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In some applications, a target needs to be located by a small-sized mobile platform, such as plane or ship. In this paper, the target is located by a small-sized mobile platform assisted by an array in the base station, which could work together under two modes: Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) mode and Multiple-Input Single-Output (MISO) mode. The geometric model is established. Also, the Geometrical Dilution Of Precision (GDOP) of the relative coordinating errors of the target are formulated and factors affecting GDOP are analyzed under the two modes respectively. Simulation results show that: under MIMO mode, the GDOP is irrelevant neither to the azimuth of the target nor to the location of the small mobile platform; the location precision under MIMO mode is higher than that under MISO mode when the small mobile platform is far from the target or the number of array elements is large; however, lower when the small mobile platform is close to the target and the number of array elements is small.

Key words: Target localization; Multiple-Input Multiple-Output (MIMO); Multiple-Input Single-Output (MISO); Geometrical Dilution Of Precision (GDOP)

1 引言

对目标进行精确定位是雷达的基本功能之一^[1,2]。多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达^[3-5]的研究与应用更是推动了这一功能的发展。若发射与接收端均使用多天线的阵列雷达, 且不同天线发射不同(通常是正交的)波形, 这样的雷达体制称为 MIMO 雷达。MIMO 雷达发射信号正交时, 在每根接收天线均可通过匹配滤

波器组将来自不同发射天线的信号进行分离, 这样根据每个信道的相位信息就可将实际接收阵列孔径扩展, 换句话说, 就是将发射孔径和接收孔径一起利用起来, 从而对目标方向形成更窄波束, 提高对目标的测角精度^[6]。若发射使用辐射正交波形的多天线阵列, 而接收端采用单根天线, 则称为多输入单输出(MISO)雷达。普遍应用的相控阵雷达由于各天线发射信号相同, 在接收端无法区分, 因此可以看作单输入多输出(SIMO)雷达^[7]。在某些应用中, 需要让小型机动平台(飞机或舰船)对目标进行定位, 但这种平台往往由于体积小而无法放置大孔径的天线阵列, 甚至只能架设单根天线, 这使其对目标的定位造成了很大局限。如果在基站固定放置一 MIMO 阵列, 用它对目标进行定位, 再将定位信息

2010-03-26 收到, 2010-09-23 改回

2006 年教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0856), 国家部委基金(51307050102), 西安电子科技大学基本科研业务费(JY10000902010), 国家杰出青年科学基金(60825104)和国家自然科学基金(61001209)资助课题

*通信作者: 晁淑媛 babytsy@163.com

换算成相对于小型机动平台的位置信息, 反馈给小型机动平台, 这样可以大大提高小型机动平台对目标的定位精度。但由于基站位置的固定性局限, 当目标远离基站时, 目标回波的信噪比(SNR)会大大降低, 从而使定位精度严重下降。受到岸舰双基地地波超视距雷达^[8,9]的启发, 我们设计了一种 MISO 模式来减弱这种 SNR 的下降, 甚至使其上升。此模式只用基站阵列发射信号, 而用小型机动平台上的单天线接收信号, 由于此平台可运动, 因此它可以接近目标以获取大 SNR, 从而获得更高的目标定位精度。

本文针对 MIMO 和 MISO 这两种工作模式, 建立起几何模型, 并分别在这两种模式下推导目标相对定位精度的几何稀释(GDOP)的计算公式, 利用 GDOP 来分析两种模式下影响目标相对定位精度的各种因素。通过计算机仿真, 对目标及小型机动平台在不同位置且阵列天线数目不同的情况, 将 MIMO 模式与 MISO 模式下的目标相对定位精度进行了分析与对比。

2 MIMO 与 MISO 工作模式的建立与处理方法

假设在基站放置一具有 M 根天线的均匀线阵, 阵元间距为半波长。基站阵列、目标和小型机动平台在同一平面内, 如图 1 所示。以阵列中心(O 点)为坐标原点, 在该平面内建立的坐标系为 xOy 坐标系, 下文中各点坐标若不特别指出是相对坐标, 均为 xOy 坐标系下的坐标。阵列各阵元向空间辐射正交波形。 B 为小型机动平台, 不发射信号, 但可以通过无线通信设备和阵列进行通信。 B 点坐标为 (x_1, y_1) , 其方位角 θ_1 , 到原点距离为 R_1 。由于最终需要使 B 得到目标相对于它的位置信息, 因此再在 xOy 平面建立一个以 B 点为原点的坐标系 $x'B'y'$, 称此坐标系下的坐标为相对坐标。 T 为目标, 其坐标为 (x_2, y_2) , 方位角为 θ_2 , 到原点距离 R_2 , 相对坐标为 (x'_0, y'_0) , 相对方位角为 θ'_0 , 到 B 点距离为 R_0 。

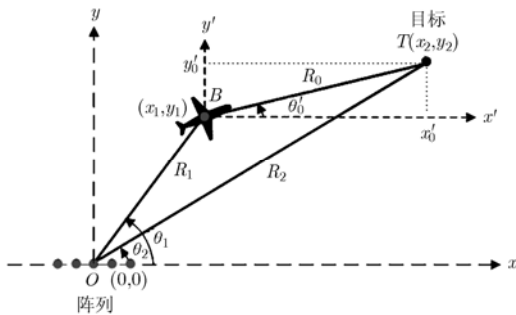


图 1 目标、阵列和小型机动平台几何关系及坐标系示意图

MIMO 模式下, 阵列各阵元均为自发自收, 每个天线发射一种正交波形, 并且也接收 M 个正交信号, 整个天线阵形成一部单基 MIMO 雷达, 目标回波 $\text{SNR} = K/R_2^4$, K 为单基地雷达常数, $K = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma F^4}{(4\pi)^3 k T_s B_n L}$, 其中, G 为天线增益; P_t , λ , k , T_s , B_n 和 L 含义见文献[10]。MISO 模式下, 阵列中每个天线也发射一种正交波形, 但是不接收信号, 目标的回波信号由 B 点的单天线接收, 由于 O 点与 B 点通常相距较远, 因此阵列与单接收天线形成一部双基 MISO 雷达, 目标回波 $\text{SNR} = K_B/(R_2^2 R_0^2)$, K_B 为单基地雷达常数, $K_B = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_B F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_s B_n L_t L_r}$, 其中 G_t 为发射天线增益, 由于发射均使用基站阵列, 因此等同于 MIMO 模式下的 G ; G_r 为接收天线增益; σ_B 为双基雷达目标截面积。由于目标相对定位精度与波束宽度和目标 SNR 均有关, 因此当目标位置、小型机动平台位置或阵列天线数目变化时, 两种模式中的哪种定位精度更高, 则需要通过具体分析来确定。

对于回波信号处理, MIMO 模式下, 接收天线通过匹配滤波可将来自不同发射天线的信号分开, 这样就可以得到 M^2 路信号, 对这 M^2 路信号进行方向图综合, 就可以得到想要的虚拟波束指向。MISO 模式下, 由于 B 点仅有一根接收天线, 因此不能形成接收方向图, 但是在接收端通过匹配滤波可以综合出虚拟发射波束指向。MIMO 模式下, 虽然其有 M^2 个通道, 但是由于是收发同置, 因此有冗余, 所以虚拟孔径不能达到实际阵列孔径的 M 倍, 只能扩展到实际阵列孔径的 2 倍, 而 MISO 模式下, 虚拟孔径与实际发射阵列孔径相等。由文献[10]可知综合出的主瓣 3 dB 波束宽度分别为

$$\theta_{3\text{dB},\text{MIMO}} = 0.886\lambda/(2D), \quad \theta_{3\text{dB},\text{MISO}} = 0.886\lambda/D \quad (1)$$

3 MIMO 模式下目标的相对定位误差分析

假设 B 点的飞机或舰船可以对自身进行较精确的定位, 即可得到 x_1 和 y_1 的值, 并通过通信设备告知基站阵列, 其横纵坐标的定位误差的标准差分别为 σ_{x_1} , σ_{y_1} 。

MIMO 模式下, 通过基站阵列可测得 R_2 和 θ_2 。测量量与坐标之间有如下关系:

$$R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad \theta_2 = \arctan(y_2/x_2),$$

$$x_2 = x'_0 + x_1, \quad y_2 = y'_0 + y_1 \quad (2)$$

对式(2)中各式求导并整理, 可得

$$d\mathbf{V}_2 = \mathbf{C}_2(d\mathbf{X}_0 + d\mathbf{X}_1) \quad (3)$$

式中 $d\mathbf{V}_2 = [dR_2 \ d\theta_2]^T$, $d\mathbf{X}_0 = [dx'_0 \ dy'_0]^T$, $d\mathbf{X}_1 = [dx_1 \ dy_1]^T$, $\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} x_2/R_2 & y_2/R_2 \\ -y_2/R_2^2 & x_2/R_2^2 \end{bmatrix}$ 。

目标相对坐标定位误差协方差矩阵为

$$\text{COV} = E[d\mathbf{X}_0 \ d\mathbf{X}_0^T] \quad (4)$$

由于各测量量的误差均相互统计独立, 因此

$$\text{COV}_{\text{MIMO}} = \mathbf{C}_2^{-1} \mathbf{P}_{\mathbf{V}_2} \mathbf{C}_2^{-T} + \mathbf{P}_{\mathbf{X}_1} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{P}_{\mathbf{V}_2} = E[d\mathbf{V}_2 \ d\mathbf{V}_2^T] = \text{diag}[\sigma_{R_2}^2, \sigma_{\theta_2}^2] \sigma_{\theta_2}$, $\mathbf{P}_{\mathbf{X}_1} = E[d\mathbf{V}_1 \ d\mathbf{V}_1^T] = \text{diag}[\sigma_{x_1}^2, \sigma_{y_1}^2]$, σ_{R_2} 和 σ_{θ_2} 分别为测量 R_2 和 θ_2 的理论误差的标准差。

通常用定位精度的几何稀释 (Geometrical Dilution of Precision, GDOP) 来描述不同位置上的定位误差, GDOP 表达式为^[11]

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}(\text{COV})} \quad (6)$$

式中 $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。将式(5)代入式(6), 得到 MIMO 模式下目标相对坐标的 GDOP:

$$\text{GDOP}_{\text{MIMO}} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{C}_2^{-1} \mathbf{P}_{\mathbf{V}_2} \mathbf{C}_2^{-T} + \mathbf{P}_{\mathbf{X}_1})} \quad (7)$$

故 MIMO 模式下目标相对坐标定位精度与 B 点定位精度、目标距离 R_2 和目标角度 θ_2 的测量精度都有关系。

R_2 和 θ_2 的测量精度与接收信号 SNR 有关, 根据雷达方程易知 SNR 与所传播的距离的四次方成反比, 故距离的变化对 SNR 的影响很大, 所以定位精度的确定必须考虑 SNR 的影响。由文献[12]可知, MIMO 模式下测量 R_2 的理论误差的标准差为

$$\sigma_{R_2} = c / \left(2\beta \sqrt{\text{SNR}(R_2)} \right) \quad (8)$$

式中 c 为光速; 假设发射信号为线性调频信号, 则 $\beta = \pi w / \sqrt{3}$, w 为信号带宽; $\text{SNR}(R_2) = K / R_2^4$ 。测量 θ_2 的理论误差的标准差为^[12]

$$\sigma_{\theta_2} = \lambda / \left(\gamma \sqrt{\text{SNR}(R_2)} \right) \quad (9)$$

式中 $\gamma = 0.51\pi\lambda / \theta_{3\text{dB}}$, λ 为波长, $\theta_{3\text{dB}}$ 为半功率波束宽度, MIMO 模式的半功率波束宽度之前已经做过分析, 令 $D = (M-1)\lambda/2$ 得到 MIMO 模式下 $\theta_{3\text{dB}} = 0.886 / (M-1)$ 。故 MIMO 模式下, 目标相对坐标定位精度与信号带宽 w 、基站阵列天线数 M 和目标距离 R_2 都有关系, 但与 B 点位置无关。虽然 \mathbf{C}_2 矩阵与 θ_2 有关, 但由于式(7)可以变形为

$$\text{GDOP}_{\text{MIMO}} = \sqrt{\text{tr}((\mathbf{C}_2 \mathbf{C}_2^T)^{-1} \mathbf{P}_{\mathbf{V}_2}) + \text{tr}(\mathbf{P}_{\mathbf{X}_1})} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{C}_2 \mathbf{C}_2^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/R_2^2 \end{bmatrix}$ 。因此 MIMO 模式下目标相对坐标定位精度与 θ_2 也无关。

4 MISO 模式下目标的相对定位误差分析

MISO 模式下, 由于基站阵列与 B 点距离较远, 因此构成一个双基体系, 此时目标的距离 R_2 不能直接测出, 只能测得距离和 $R_{\Sigma} = R_2 + R_0$ 。目标角度 θ_2 可以通过在接收端综合虚拟发射方向图测得。测量量与坐标之间有如下关系:

$$R_{\Sigma} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} + \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

$$\theta_2 = \arctan(y_2 / x_2), \quad x_2 = x'_0 + x_1, \quad y_2 = y'_0 + y_1 \quad (11)$$

对式(11)中各式求导并整理, 得

$$d\mathbf{V} = \mathbf{C} d\mathbf{X}_0 + \mathbf{C}_2 d\mathbf{X}_1 \quad (12)$$

式中 $d\mathbf{V} = [dR_{\Sigma} \ d\theta_2]^T$,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} x_2/R_2 + x'_0/R_0 & y_2/R_2 + y'_0/R_0 \\ -y_2/R_2^2 & x_2/R_2^2 \end{bmatrix}$$

因此

$$\text{COV}_{\text{MISO}} = E[d\mathbf{X}_0 \ d\mathbf{X}_0^T] = \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{P}_{\mathbf{V}} + \mathbf{C}_2 \mathbf{P}_{\mathbf{X}_1} \mathbf{C}_2^T) \mathbf{C}^{-T} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{P}_{\mathbf{V}} = E[d\mathbf{V} d\mathbf{V}^T] = \text{diag}[\sigma_{R_{\Sigma}}^2, \sigma_{\theta_2}^2]$, $\sigma_{R_{\Sigma}}$ 和 σ_{θ_2} 分别为测量 R_{Σ} 和 θ_2 的理论误差的标准差。将式(13)代入式(6), 得到 MISO 模式下目标相对坐标的 GDOP 为

$$\text{GDOP}_{\text{MISO}} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{C}^{-1} (\mathbf{P}_{\mathbf{V}} + \mathbf{C}_2 \mathbf{P}_{\mathbf{X}_1} \mathbf{C}_2^T) \mathbf{C}^{-T})} \quad (14)$$

可见 MISO 模式下目标相对坐标定位精度与 B 点定位精度、目标发射接收距离和 R_{Σ} 和目标角度 θ_2 的测量精度都有关系。

由文献[12]可知, MISO 模式下测量 R_{Σ} 的理论误差的标准差为

$$\sigma_{R_{\Sigma}} = c / \left(\beta \sqrt{\text{SNR}(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)} \right) \quad (15)$$

式中 c 与 β 含义同式(8)。

$$\text{SNR}(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)$$

$$= K_B / \left(R_2(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)^2 R_0(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)^2 \right) \quad (16)$$

$R_2(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)$ 与 $R_0(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)$ 可由下式解算:

$$R_2(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2) = (R_{\Sigma}^2 - x_1^2 - y_1^2)$$

$$\left/ \left[2 \left[R_{\Sigma}^2 - \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cos \left(\arctan \frac{y_1}{x_1} - \theta_2 \right) \right] \right] \right\} \quad (17)$$

$$R_0(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2) = R_{\Sigma} - R_2(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2) \quad (18)$$

测量 θ_2 的理论误差的标准差为^[12]

$$\sigma_{\theta_2} = \lambda / \left(\gamma \sqrt{\text{SNR}(x_1, y_1, R_{\Sigma}, \theta_2)} \right) \quad (19)$$

式中 $\gamma = 0.51\pi\lambda / \theta_{3\text{dB}}$, λ 为波长, $\theta_{3\text{dB}}$ 为之前分析过的 MISO 模式下的半功率波束宽度, $\theta_{3\text{dB}} = 1.772 / (M-1)$ 。故 MISO 模式下, 目标相对坐标定位精度与信号带宽 w 、基站阵列天线数 M 、 B 点位置, 目标距离 R_2 和目标角 θ_2 都有关系。

5 MIMO 与 MISO 模式定位误差仿真分析及对比

下面通过仿真来分析 MIMO 模式与 MISO 模式的目标相对定位精度。由于误差的具体值与雷达参数的选取有关, 为表示与对比的简便, 我们给两种工作模式下的 GDOP 均乘以一个相同的比例因子, 称结果为比例 GDOP, 再画出其等高线图。由于目标坐标、小型机动平台坐标、目标相对坐标和阵列天线数的变化都会对目标相对坐标 GDOP 造成影响, 因此对这些因素逐一进行分析, 仿真中假设除所分析因素外其他条件均不变, $\sigma_{x_1} = 10 \text{ m}$, $\sigma_{y_1} = 10 \text{ m}$ 。

5.1 B 点相对目标位置固定时目标位置对定位精度的影响

仿真条件为 $M=10$, 目标对 B 点的相对位置 $(x'_0, y'_0) = (50, 50) \text{ km}$ 。图 2 为目标在 xOy 平面上运动时其相对坐标的比例 GDOP。图 2(b) 第 3 象限的角平分线上, 由于目标恰好处于双基地的基线上, 因此定位精度非常低。并且由于 B 点距目标较远, 因此在各个位置, MIMO 模式的定位精度均高于 MISO 模式。

5.2 B 点位置固定时目标位置对定位精度的影响

仿真条件为 $M=10$, B 点位置 $(x_1, y_1) = (50, 50) \text{ km}$ 。图 3 表示目标在 xOy 平面上运动时其相对坐标的比例 GDOP。由图 3(a) 可看出 MIMO 模式下目标的相对定位精度与目标距离有关, 而与目标方位角无关。对比图 2(a) 和图 3(a) 发现两图相同, 因此表明 MIMO 模式下目标的相对定位精度与 B 点位置无关。

5.3 目标位置固定时 B 点位置对定位精度的影响

仿真条件为 $M=10$, 目标位置分别为 $(x_2, y_2) = (50, 50) \text{ km}$, $(x_2, y_2) = (100, 100) \text{ km}$ 和 $(x_2, y_2) = (150, 150) \text{ km}$ 。由于 MIMO 模式下目标的相对定位精度与 B 点的位置无关, 因此目标的 GDOP 在 xOy 平面上是等值的, 从图 2(a) 和图 3(a) 均可看出 $(x_2,$

$y_2) = (50, 50) \text{ km}$, $(x_2, y_2) = (100, 100) \text{ km}$ 和 $(x_2, y_2) = (150, 150) \text{ km}$ 时, 目标相对坐标的比例 GDOP 分别为 0.02, 0.16 和 0.54。而 MISO 模式下目标的相对定位精度与 B 点的位置有关, 图 4(a)、4(b) 和 4(c) 分别表示 MISO 模式下, $(x_2, y_2) = (50, 50) \text{ km}$, $(x_2, y_2) = (100, 100) \text{ km}$ 和 $(x_2, y_2) = (150, 150) \text{ km}$ 时 B 点在 xOy 平面上运动时目标相对坐标的比例 GDOP。由图 4 可以看出目标离阵列越远, 定位精度越低。并且 MISO 模式下, 平面上大部分区域的定位精度都低于 MIMO 模式。然而, 除了目标右上角的区域外, 随着 B 点接近目标, MISO 模式的定位精度均是逐步提高的。当 B 点移动到目标附近的某个小区域时, MISO 模式由 SNR 和双基几何关系带来的定位精度优势会超过其波束综合带来的劣势, 这时 MISO 模式的定位精度就超过了 MIMO 模式。

5.4 MIMO 模式与 MISO 模式的择优区域

由于 MIMO 模式与 MISO 模式在不同情况下定位精度优劣不同, 因此我们可以采用两种方式切换使用的方式对目标进行精确定位。图 5 中的黑色部分是 $M=10$, 目标位置分别为 $(x_2, y_2) = (50, 50) \text{ km}$, $(x_2, y_2) = (100, 100) \text{ km}$ 和 $(x_2, y_2) = (150, 150) \text{ km}$ 时 MISO 模式优于 MIMO 模式的区域放大图。对比图 5(a), 5(b) 和 5(c) 发现, 目标离阵列越远, MISO 模式优于 MIMO 模式的区域越大。这是因为目标离阵列越远, MIMO 模式下目标回波的 SNR 就越低, MISO 模式下 B 点在离目标稍远的距离时目标回波的 SNR 提高所带来的定位优势就可以补偿掉其由波束综合带来的劣势; 而目标离阵列越近, MIMO 模式下目标回波的 SNR 就越高, 这样 MISO 模式下 B 点必须在非常接近目标时, 目标回波的 SNR 提高所带来的定位优势才可以超出 MIMO 模式由波束综合带来的优势。

图 6 描绘了 MISO 模式优于 MIMO 模式的区域面积随基站阵列天线数目变化的曲线。可见, 阵列

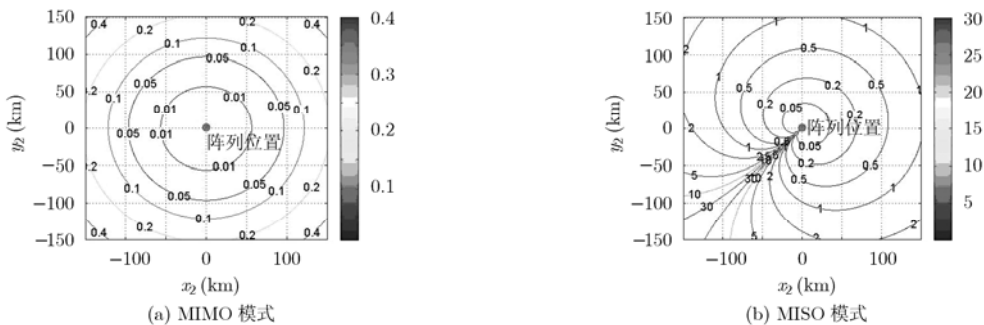


图 2 $(x'_0, y'_0) = (50, 50) \text{ km}$ 时目标相对坐标的比例 GDOP

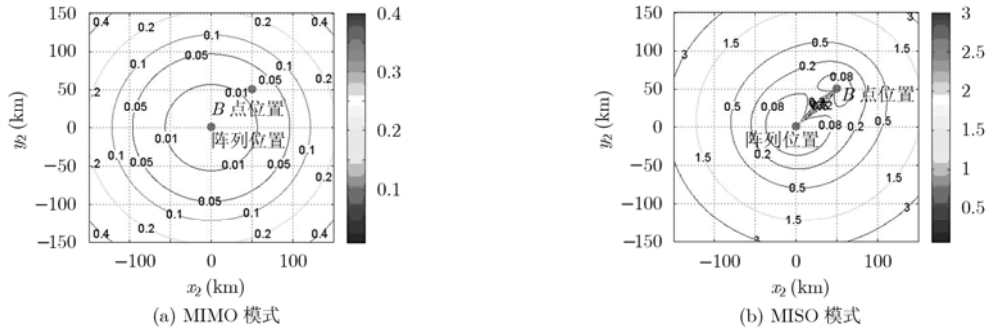


图 3 $(x_1, y_1) = (50, 50)$ km 时目标相对坐标的比例 GDOP

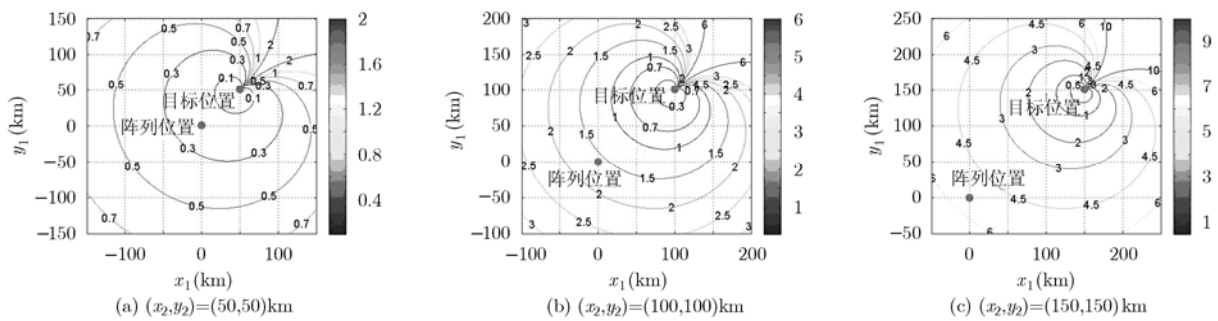


图 4 MISO 模式下目标位置固定时目标相对坐标的比例 GDOP

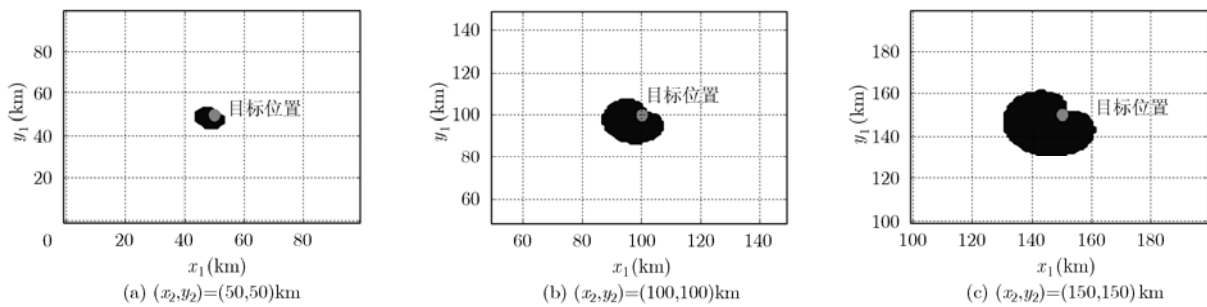


图 5 $M=10$ 时 MISO 模式优于 MIMO 模式的区域

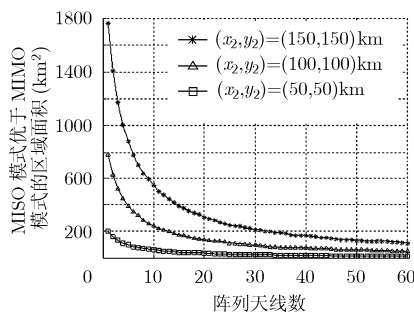


图 6 MISO 模式优于 MIMO 模式的区域面积 vs 阵列天线数目

天线数越少, MISO 模式优于 MIMO 模式的区域越大。这是因为阵列天线数目越少, MIMO 模式下的虚拟孔径扩展量就越少, 这样由波束综合带来的测角和 SNR 优势就越少。MISO 模式下 B 点在离目标稍远的距离时目标回波的 SNR 提高所带来的定位

优势就可以补偿掉其由波束综合带来的劣势; 而阵列天线数目越多, MIMO 模式下的虚拟孔径扩展量就越多, 这样在 MISO 模式下 B 点必须在非常接近目标时, 目标回波的 SNR 提高所带来的定位优势才可以超出 MIMO 模式由波束综合带来的优势。

6 结论

本文针对某些应用环境的需要提出了单基 MIMO 与双基 MISO 两种模式来完成小型机动平台对目标的精确定位, 利用 GDOP 分析并对比了这两种模式下目标的相对定位精度, 仿真结果证明两种模式下目标的相对定位精度均与目标距离有关。MISO 模式下, 目标的相对定位精度还与目标方位角及小型机动平台位置有关; 而 MIMO 模式下, 目标的相对定位精度与目标方位角和小型机动平台位置均无关。当小型机动平台离目标较远时, MIMO

模式的定位精度高于 MISO 模式, 随着小型机动平台接近目标, MISO 模式的定位精度逐步提高, 并在某一界限超过 MIMO 模式, 因此可采用 MIMO 模式与 MISO 模式切换使用的方式提高雷达对目标的定位精度。另外, 目标离基站阵列越近或基站阵列天线数越多, MISO 模式的优势将会越来越不明显, 其占优势的区域将越来越小。

参 考 文 献

- [1] Godrich H, Haimovich A M, and Blum R S. Cramer Rao bound on target localization estimation in MIMO radar systems [C]. 42nd Annual Conf. Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, United States, March 19–21, 2008: 134–139.
 - [2] Godrich H, Haimovich A M, and Blum R S. A comparative study of target localization in MIMO radar systems [C]. Waveform Diversity and Design Conference, Kissimmee, FL, United States, February 8–13, 2009: 124–128.
 - [3] Fishler E, Haimovich A, Blum R, Chizhik D, Cimini L, and Valenzuela R. MIMO radar: an idea whose time has come [C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, United States, April 26–29, 2004: 71–78.
 - [4] Lehmann N H, Haimovich A M, Blum R S, and Cimini L. High resolution capabilities of MIMO radar [C]. 40th Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, United States, October 29–November 1, 2006: 25–30.
 - [5] Lesturgie M. Improvement of high-frequency surface waves radar performances by use of multiple-input multiple-output configurations [J]. *IET, Radar, Sonar and Navigation*, 2009, 3(1): 49–61.
 - [6] Lehmann N H, Fishler E, Haimovich A M, Blum R S, Chizhik D, Cimini L J Jr., and Valenzuela R A. Evaluation of transmit diversity in MIMO-radar direction finding[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(5): 2215–2225.
 - [7] Fishler E, Haimovich A M, Blum R S, Cimini L J Jr, Chizhik D, and Valenzuela R A. Spatial diversity in radars-models and detection performance [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823–838.
 - [8] 尚海燕. 岸舰双/多基地地波超视距雷达机动目标的检测[D]. [博士论文]. 西安电子科技大学, 2008.
 - [9] 陈多芳. 岸-舰双基地波超视距雷达若干问题研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2008.
 - [10] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 211–222.
 - [11] 孙仲康, 周一宇, 何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 37–38.
 - [12] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 86–91.
- 晁淑媛: 女, 1983 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 雷达、阵列信号处理及目标检测.
- 陈伯孝: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为新体制雷达系统设计、阵列信号处理、精确制导与目标跟踪等.
- 杨明磊: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为 MIMO 雷达、综合脉冲与孔径雷达及其实现.