

# 基于PDOA着靶点参数估计的阵列布放结构研究

王旭 庞义卓 白嘉豪 王文静 魏国华\*

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

**摘要:** 在基于到达相位差(Phase Differences Of Arrival, PDOA)的着靶点参数估计问题中, 估计精度受到阵列结构的影响。与一般的单点目标定位问题相比, 着靶点参数估计需要同时估计目标的速度和角度参数, 情况更加复杂。为了选择合适的阵列结构以对定位结果带来有利影响, 该文从灵敏度的角度分析了不同阵列结构下靶点参数估计精度各有差异的原因, 为判断不同情况下接收阵列定位性能的优劣提供了理论方法。最后, 对3种常见阵列结构进行了计算机仿真对比, 仿真结果验证了利用灵敏度指标对阵列布放结构进行评估的可行性。

**关键词:** 着靶点参数估计; 到达相位差; 阵列布放结构

中图分类号: TN911.7; TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1251-07

DOI: 10.11999/JEIT200081

## Study of Array Structure for Sensor Placement in PDOA-based Hit Position Estimation

WANG Xu PANG Yizhuo BAI Jiahao WANG Wenjing WEI Guohua

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Different sensor placements have a great influence on the accuracy in Phase Differences Of Arrival (PDOA)-based hit position estimation. Compared with single time target localization, estimation of hit position is more complex because of additionally considering speed and its direction. In order to choose an adequate sensor geometry for source localization, a method of evaluating the performance of sensor placement by sensitivity analysis is proposed, which provides a theoretical foundation for analyzing the accuracy of hit position estimation. Then the sensitivities of three typical sensor geometries are analyzed and Cramer-Rao Lower Bound is compared to verify the effectiveness of the proposed method using computer simulations.

**Key words:** Hit position estimation; Phase Differences of Arrival; Array structure

### 1 引言

在导弹靶场试验中, 测量目标着靶点坐标和目标运动方向对于评估导弹性能起着关键作用<sup>[1]</sup>。在导弹与靶平面交会的过程中, 天线阵列中接收到目标辐射信号的天线间相位差随时间的变化规律由导弹的速度矢量和矢量脱靶量一共6个参数决定。在目标运动模型已知的前提下, 测量系统通过互相关或其他方法可得到接收阵元间的相位差时间序列数据, 进一步再通过构建方程组进行求解等方法就能估计出着靶点坐标和目标运动方向<sup>[2]</sup>。着靶点的测量精度不但与相位差数据提取精度有关, 而且也受到天线阵列布放结构的影响, 因此天线阵列几何结

构的优化问题一直被广泛讨论和研究<sup>[3-7]</sup>。文献<sup>[8-10]</sup>对平面阵列的不同布放结构进行了对比和分析, 但是其结论不能直接推广应用到3维空间的定位问题中。本文针对3维空间着靶点参数估计问题, 建立了观测模型, 阐述了采用非线性寻优处理进行参数估计的方法, 提出了一种从灵敏度<sup>[10]</sup>的角度对比不同阵列布放结构性能的方法, 并利用着靶点估计CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)的理论推导和数值计算验证了该方法的可靠性<sup>[11]</sup>。

### 2 定位原理

#### 2.1 观测模型

假设目标做速度为 $v$ 的匀速直线运动, 设 $\mathbf{P}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ 为起始观测零时刻( $t = 0$ )的目标位置点,  $\mathbf{P}_\theta = [x_\theta, y_\theta, z_\theta]^T$ 为着靶时刻的目标位置点, 观测长度 $|\mathbf{P}_0\mathbf{P}_\theta|$ 为 $L$ 。当目标绝对速度 $v$ 已知时, 目标的运动轨迹可用 $\mathbf{W} = [x_\theta, y_\theta, z_\theta, \alpha, \beta]^T$ 这5个参数表示, 其中弹道偏角 $\alpha$ 表示目标运动轨迹在 $xoy$ 平面

收稿日期: 2020-01-19; 改回日期: 2020-10-30; 网络出版: 2020-12-15

\*通信作者: 魏国华 ghwei@bit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671059)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61671059)

上的投影与 $x$ 正轴夹角, 弹道倾角 $\beta$ 表示目标运动轨迹与 $xoy$ 平面夹角。第 $t_i$ 时刻( $i = 0, 1, \dots, I-1$ )目标轨迹点坐标为 $\mathbf{P}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ , 其中 $I$ 为总的的数据提取点数,  $T$ 为数据提取间隔。天线阵列由 $Q$ 个接收天线组成,  $\mathbf{s}_q = [x_q, y_q, z_q]^T$ ( $q = 1, 2, \dots, Q$ )为接收天线的坐标, 目标轨迹与靶平面的相对位置关系如图1所示。

以着靶点坐标为参考, 目标在 $t_i$ 时刻的速度与轨迹点坐标分别满足式(1):

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v \cos \beta \cos \alpha \\ v_y &= v \cos \beta \sin \alpha \\ v_z &= -v \sin \beta \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} x_i &= x_\theta - v_x[(I-1)T - t_i] \\ y_i &= y_\theta - v_y[(I-1)T - t_i] \\ z_i &= z_\theta + v_z[(I-1)T - t_i] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中,  $v_x, v_y, v_z$ 表示 $t_i$ 时刻目标在 $X, Y, Z$ 3个方向上的速度分量。

## 2.2 着靶点坐标估计

在匀速直线运动模型下, 导弹在 $t_i$ 时刻与天线 $s_q$ 的距离可以表示为

$$d_{q,i} = \sqrt{(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2 + (z_q - z_i)^2}, \quad q = 1, 2, \dots, Q \quad (2)$$

假定选取 $P$ 对接收天线进行相位差提取, 第 $p$ 对天线由天线 $m$ 和天线 $n$ 组成, 则目标在 $t_i$ 时刻时, 接收天线 $m, n$ 间的无模糊相位差可以表示为

$$\phi_{p,i} = \frac{2\pi[d_{m,i} - d_{n,i}]}{\lambda}, \quad i = 0, 1, \dots, I-1; \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (3)$$

其中,  $\lambda$ 为波长。假定每一对接收天线在不同时刻的相位差测量误差服从零均值独立高斯分布, 则 $t_i$ 时刻的观测值可以表示为

$$\bar{\phi}_{p,i} = \phi_{p,i} + \eta_\phi, \quad \eta_\phi \sim N(0, \sigma_\phi^2) \quad (4)$$

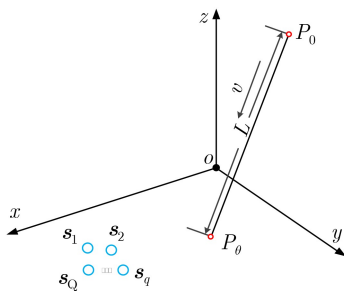


图1 目标轨迹与靶平面之间的相对位置关系

于是天线对 $p$ 的无模糊相位差时间序列可以表示为

$$\bar{\mathbf{f}}_p = [\phi_{p,0}, \phi_{p,2}, \dots, \phi_{p,I-1}]^T, \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (5)$$

提取到观测量 $\bar{\mathbf{f}}_p$ 后, 构造向量 $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = [\mathbf{f}_1^T, \mathbf{f}_2^T, \dots, \mathbf{f}_P^T]^T \quad (6)$$

对应的观测向量为 $\bar{\mathbf{X}}$ , 即可建立代价函数

$$J = (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})^T \quad (7)$$

最后可通过求解式(8)最小二乘估计问题, 得到着靶点坐标的估计结果 $\hat{\mathbf{P}}_\theta$ :

$$\hat{\mathbf{P}}_\theta = \arg \min_{\mathbf{P}_\theta} J \quad (8)$$

## 3 灵敏度分析

### 3.1 灵敏度

灵敏度反映了待估计参数的变化对观测量的影响情况。2维平面上利用平面阵的目标定位问题中, 阵列布放结构与定位精度的关系可以通过几何分析比较直观地得出结论<sup>[8]</sup>, 而且不同方向上定位精度的差异与基线分量的排布紧密相关。但是在3维空间下对着靶点参数估计的精度, 除了会受到观测噪声大小、阵列布放结构和落点坐标影响以外, 还会受到弹道偏角 $\alpha$ 、弹道倾角 $\beta$ 、观测点数 $I$ 和数据提取间隔 $T$ 的影响, 估计过程更复杂, 很难通过几何分析的方式直观地比较不同阵列布放结构的优劣。灵敏度可以反映相位差观测量受目标运动参数的影响情况<sup>[10]</sup>, 对于某个运动目标来说, 天线阵列布局的不同会造成灵敏度的差异, 因此比较灵敏度大小对判断阵列布放结构的优劣有价值。

为了简化表达式, 令

$$\left. \begin{aligned} A &= (I-i) \cos \beta \cos \alpha, B = (I-i) \cos \beta \sin \alpha \\ C &= (I-i) \sin \beta \cos \alpha, D = (I-i) \sin \beta \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

则 $t_i$ 时刻目标与天线 $m$ 和天线 $n$ 的距离可分别表示为

$$d_{m,i} = \sqrt{[x_\theta - x_m - TvA]^2 + [y_\theta - y_m - TvB]^2 + [z_\theta - z_m + (I-i)Tv \sin \beta]^2} \quad (10)$$

$$d_{n,i} = \sqrt{[x_\theta - x_n - TvA]^2 + [y_\theta - y_n - TvB]^2 + [z_\theta - z_n + (I-i)Tv \sin \beta]^2} \quad (11)$$

则在速度 $v$ 已知的情况下, 第 $p$ 个天线对在 $t_i$ 时刻的相位差 $\phi_{p,i}$ 可表达为

$$\phi_{p,i} = (d_{m,i} - d_{n,i}) \cdot 2\pi/\lambda \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{P}_\theta = [x_\theta, y_\theta, z_\theta]^T$ 为着靶点坐标,  $T$ 为相位差数据提取间隔,  $I$ 为数据提取点数。对 $\phi_{p,i}$ 求全微分可以得到

$$\begin{aligned} \Delta \phi_{p,i} &= \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial x_\theta} \Delta x_\theta + \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial y_\theta} \Delta y_\theta + \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial z_\theta} \Delta z_\theta \\ &+ \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \beta} \Delta \beta \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial x_\theta} = \{[x_\theta - x_m - TvA]/d_{m,i} - [x_\theta - x_n - TvA]/d_{n,i}\} \cdot 2\pi/\lambda \quad (14)$$

$$\frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial y_\theta} = \{[y_\theta - y_m - TvB]/d_{m,i} - [y_\theta - y_n - TvB]/d_{n,i}\} \cdot 2\pi/\lambda \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial z_\theta} = \{[z_\theta - z_m + Tv \sin \beta]/d_{m,i} - [z_\theta - z_n + Tv \sin \beta]/d_{n,i}\} \cdot 2\pi/\lambda \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \alpha} = \{TvB[x_\theta - x_m - TvA]/d_{m,i} - TvA[y_\theta - y_m - TvB]/d_{m,i}\} \cdot 2\pi/\lambda - \{TvB[x_\theta - x_n - TvA]/d_{n,i} - TvA[y_\theta - y_n - TvB]/d_{n,i}\} \cdot 2\pi/\lambda \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \beta} = \{TvC[x_\theta - x_m - TvA]/d_{m,i} + TvD[y_\theta - y_m - TvB]/d_{m,i} - (I-i)Tv \cos \beta [z_\theta - z_m + (I-i)Tv \sin \beta]/d_{m,i}\} \cdot 2\pi/\lambda - \{TvC[x_\theta - x_n - TvA]/d_{n,i} + TvD[y_\theta - y_n - TvB]/d_{n,i} - (I-i)Tv \cos \beta [z_\theta - z_n + (I-i)Tv \sin \beta]/d_{n,i}\} \cdot 2\pi/\lambda \quad (18)$$

根据式(13)可以得到 $P$ 对接收天线的相位差时间序列受着靶点坐标 $\mathbf{P}_\theta = [x_\theta, y_\theta, z_\theta]^T$ 影响的灵敏度

$$F(\mathbf{P}_\theta) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{I-1} \left( \left| \frac{\partial f_{p,i}}{\partial x_\theta} \right| + \left| \frac{\partial f_{p,i}}{\partial y_\theta} \right| + \left| \frac{\partial f_{p,i}}{\partial z_\theta} \right| \right) \quad (19)$$

以及受目标运动方向 $\mathbf{S} = [\alpha, \beta]^T$ 影响的灵敏度

$$F(\mathbf{S}) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^{I-1} \left( \left| \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \alpha} \right| + \left| \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \beta} \right| \right) \quad (20)$$

$F(\mathbf{P}_\theta)$ 和 $F(\mathbf{S})$ 的值体现了着靶点坐标的变化对相位差时间序列整体值的影响,  $F(\mathbf{P}_\theta)$ 和 $F(\mathbf{S})$ 越大, 理论上定位效果也会更好。

### 3.2 CRLB

为了验证利用灵敏度信息比较不同阵列布局定位性能的可靠性, 推导了利用无模糊相位差对匀速直线运动目标参数进行估计的CRLB。令 $\mathbf{g}(i) = [\phi_{1,i}, \phi_{2,i}, \dots, \phi_{P,i}]^T$ , 为 $t_i$ 时刻观测的 $P$ 组无模糊相位差, 则多次观测的无模糊相位差 $\mathbf{H} = [\mathbf{g}(1)^T, \mathbf{g}(2)^T, \dots, \mathbf{g}(I)^T]^T$ , 则待估计参数 $\mathbf{w} = [x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta]^T$ 的方差为

$$\text{var}(w_i) \geq [F^{-1}(w)]_{ii} \quad (21)$$

其中,  $\mathbf{F}(w)$ 为 $5 \times 5$ 的Fisher信息矩阵, 则

$$[\mathbf{F}(w)]_{ij} = -E \left[ \frac{\partial \ln p(\mathbf{H}; w)}{\partial w_i} \frac{\partial \ln p(\mathbf{H}; w)}{\partial w_j} \right] \quad (22)$$

设来波信号的信噪比为SNR, 则 $\phi_{p,i}$ 的均方根误差 $\sigma_\phi = \sqrt{1/\text{SNR}}$ 。则由式(22)可以得到待估参数的CRLB界为

$$\text{CRLB}(w) = \left\{ \left( \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial w} \right)^T \mathbf{R}^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial w} \right) \right\}^{-1} \quad (23)$$

其中,  $\mathbf{R} = \sigma_\phi^2 \mathbf{I}_{PI}$ 为协方差矩阵,  $\mathbf{I}_{PI}$ 为 $PI \times PI$ 的单位阵, 可见信号的信噪比越大, Fisher信息矩阵中各项的值越大, CRLB越小。式(23)中

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial w} &= \left[ \frac{\partial \mathbf{g}(1)}{\partial w} \dots \frac{\partial \mathbf{g}(i)}{\partial w} \dots \frac{\partial \mathbf{g}(I)}{\partial w} \right]^T \\ \frac{\partial \mathbf{g}(i)}{\partial w} &= \left[ \frac{\partial \phi_{1,i}}{\partial w} \frac{\partial \phi_{2,i}}{\partial w} \dots \frac{\partial \phi_{P,i}}{\partial w} \right]^T \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

其中,  $\frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial w} = \left[ \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial x_\theta}, \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial y_\theta}, \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial z_\theta}, \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \alpha}, \frac{\partial \phi_{p,i}}{\partial \beta} \right]^T$ ,

式(14)–式(18)给出了各项的解析式。因此, 可以得到着靶点坐标估计及角度估计的CRLB。为了方便与灵敏度计算结果进行对比, 将着靶点坐标 $\mathbf{P}_\theta = [x_\theta, y_\theta, z_\theta]^T$ 和目标运动方向 $\mathbf{A} = [\alpha, \beta]^T$ 的CRLB分别表示为

$$\left. \begin{aligned} C(\mathbf{P}_\theta) &= \text{CRLB}(x) + \text{CRLB}(y) + \text{CRLB}(z) \\ C(\mathbf{A}) &= \text{CRLB}(\alpha) + \text{CRLB}(\beta) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

### 3.3 计算机仿真

选择了3种空间阵列类型进行灵敏度的分析, 分别是常见的中心辐射阵、面心辐射阵和参考阵元位于平行于 $z$ 轴棱边中点的顶角辐射阵, 如图2所示。为了更好地比较和分析3种阵型的着靶点坐标估计性能, 3种阵型都选取了8组天线对来提取相位差数据, 参考阵元分别位于坐标 $[0, 0, 2]^T$  m,  $[0, 0, 0]^T$  m和 $[-2, -2, 2]^T$  m处。

在 $oxy$ 平面上 $x \in [-50, 50]$  m,  $y \in [-50, 50]$  m的方形区域上以 $2 \times 2$  m<sup>2</sup>的方格为单位均匀地选择2601个点作为待测的着靶点。以中心辐射阵为例, 天线阵列与所选靶平面的相对位置关系如图3所示。设目标匀速直线运动速度为800 m/s, 波长 $\lambda = 0.15$  m, 数据提取点数 $I = 500$ 个, 信噪比SNR=9 dB, 数据提取间隔 $T = 1$  ms。选取弹道偏角 $\alpha = 10^\circ$ , 弹道倾角 $\beta = 80^\circ$ , 观测量对着靶点坐标变化的灵敏度和坐标估计CRLB分布情况如图4和图5所示。为了更清晰地对比靶平面上3种阵列灵敏度和CRLB由近到远的变化情况, 在坐标原点 $O$ 到点 $[50, 50, 0]^T$  m这条线段上均匀选择6个点来做比较, 如表1所示。

由图4、图5和表1可见, 中心辐射阵和面心辐射阵对着靶点坐标的灵敏度分布特征比较相似, 在

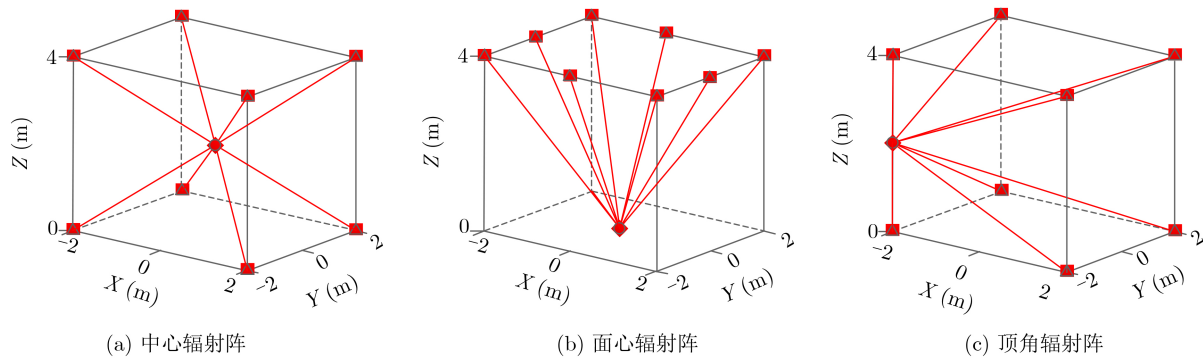


图2 3种常见空间阵列

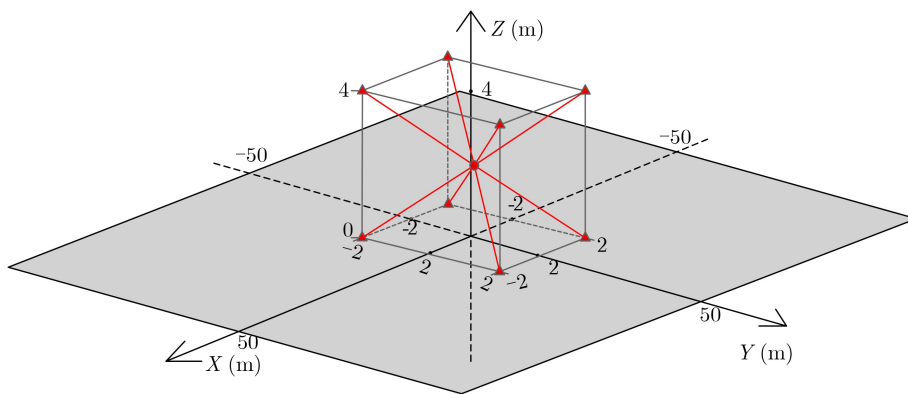


图3 阵列与靶平面的相对位置

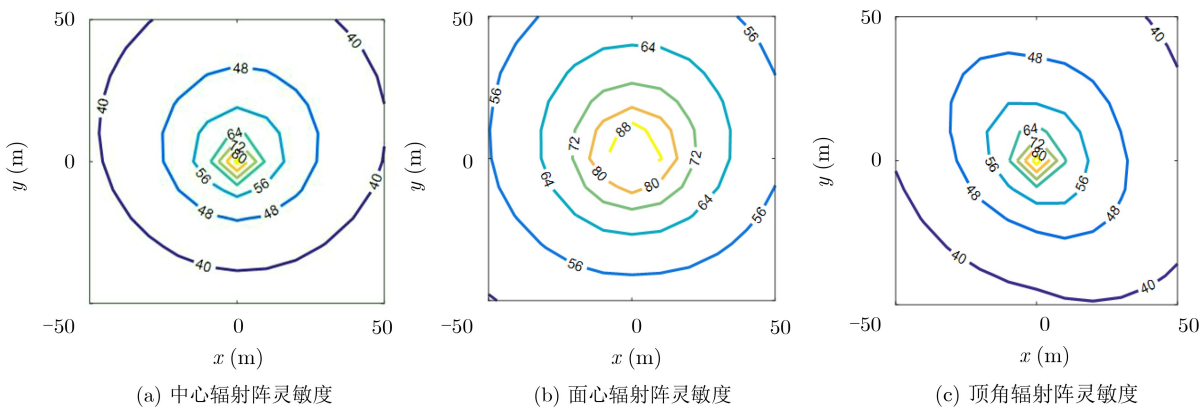


图4 观测量对着靶点位置变化的灵敏度

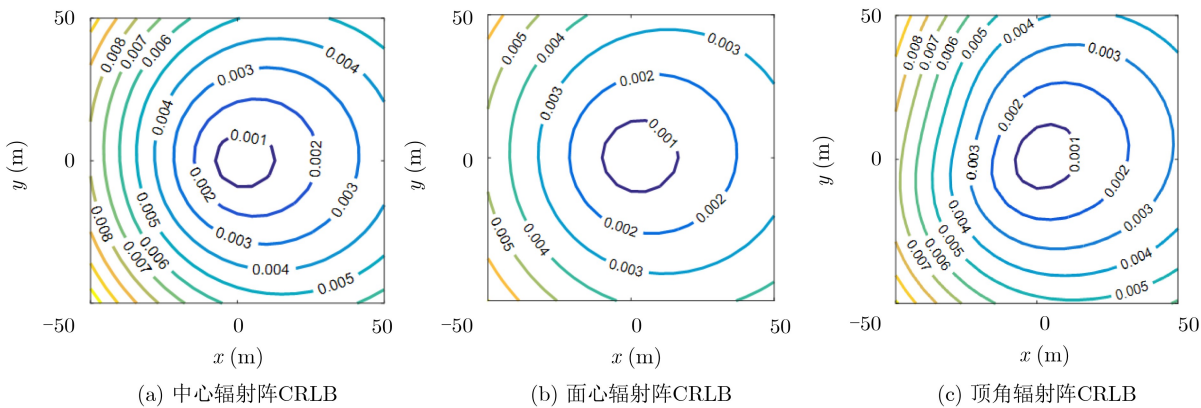


图5 着靶点位置估计CRLB

各个方向上灵敏度变化比顶角辐射阵更加均匀，并且具有着靶点距离靶中心越远灵敏度越低、CRLB越大的特点。从数值上看，面心辐射阵的灵敏度值最高，顶角辐射阵次之，中心辐射阵最低。这说明同样是选取8对接收天线提取相位差的情况下，面心辐射阵的相位差观测测量对着靶点坐标的变化最敏感，而中心辐射阵最迟钝。CRLB的计算结果也验证了这一点，如图5所示，从靶平面上的整体数值分布来看，面心辐射阵的CRLB界最低，即无偏估计理论上可以达到的精度最佳，顶角辐射阵次之，中心辐射阵最差，与灵敏度计算结果反映的3种阵列的优劣情况一致。

同样仿真条件下，观测测量对目标运动角度参数

变化的灵敏度和角度估计CRLB分布情况如图6和图7所示。

比较观测测量对角度参数的灵敏度和角度估计CRLB的计算结果可以看出，在整个靶平面上，顶角辐射阵的灵敏度最大，CRLB也最低。中心辐射阵的灵敏度高于面心辐射阵，靶平面中部区域的CRLB也优于面心辐射阵，但是对于着靶点位于靶平面边缘的运动目标，面心辐射阵的目标参数估计CRLB则小于中心辐射阵。可见，对某些轨迹存在着观测测量对角度参数灵敏度越大，CRLB反而越差的现象。通过式(13)和式(21)可以看出，观测测量对某一个目标运动参数变化的灵敏度与其它参数的变化无关，而CRLB的计算过程中，不同的运动参数

表 1 不同阵列的灵敏度和CRLB对比

坐标 (m)	(0,0,0)	(10,10,0)	(20,20,0)	(30,30,0)	(40,40,0)	(50,50,0)
中心辐射阵灵敏度	90.47	59.27	49.49	44.13	40.43	37.60
面心辐射阵灵敏度	132.31	83.81	69.89	62.36	57.23	53.34
顶角辐射阵灵敏度	92.06	59.83	50.14	44.83	41.16	38.35
中心辐射阵CRLB	3.9e-5	5.9e-4	0.0017	0.0031	0.0049	0.0071
面心辐射阵CRLB	4.8e-5	3.7e-4	0.001	0.0019	0.0029	0.0041
顶角辐射阵CRLB	4.7e-5	4.1e-4	0.0011	0.002	0.0031	0.0045

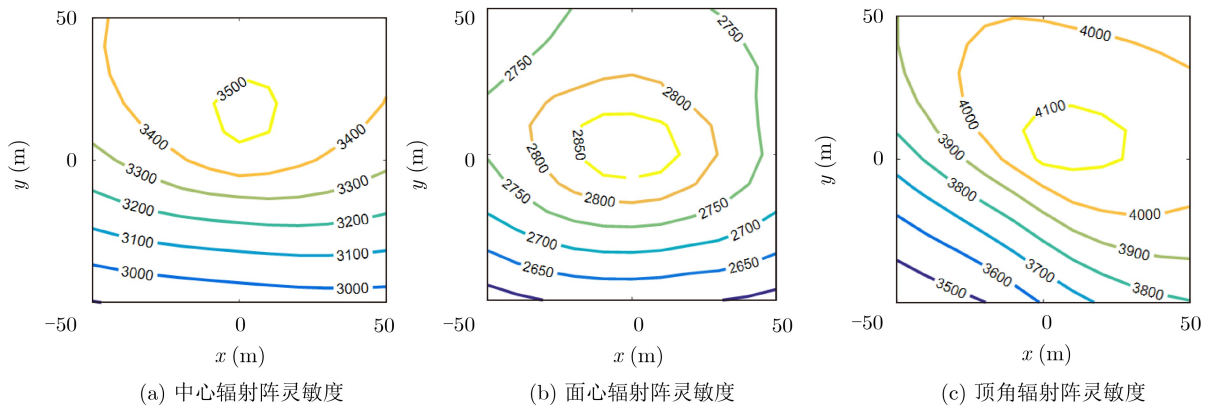


图 6 观测测量对目标运动角度参数变化的灵敏度

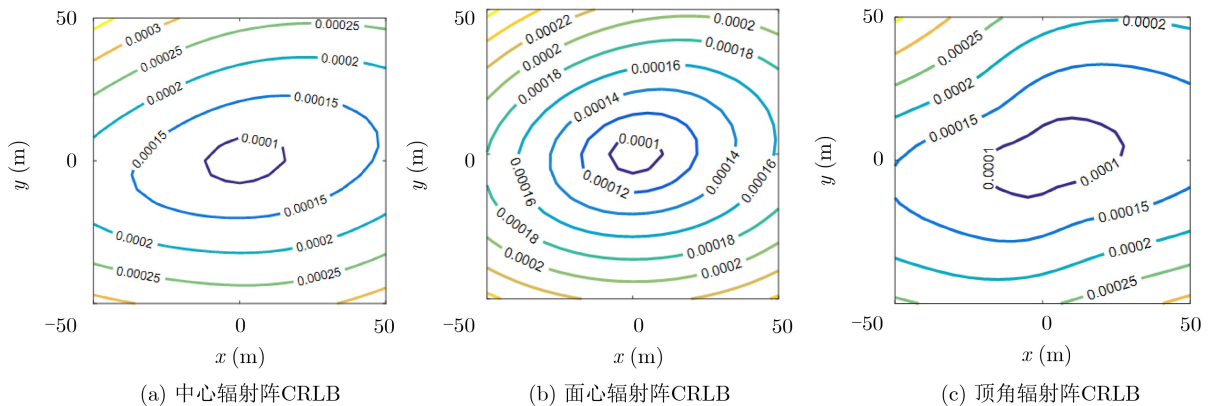


图 7 目标运动角度估计CRLB

则互相影响。当假设其余参数已知时,即排除参数间相互影响,某个参数的CRLB与灵敏度的分布情况更加一致。仿真条件不变,假设着靶点坐标 $P_\theta = [x_\theta, y_\theta, z_\theta]^T$ 和弹道倾角 $\beta$ 已知,弹道偏角 $\alpha$ 的CRLB和灵敏度对比结果如图8和图9所示。

通过仿真计算结果可以看出,顶角辐射阵灵敏度最高同时CRLB最优,中心辐射阵次之,面心辐射阵最差。可见,当假设除弹道偏角 $\alpha$ 外的参数均为已知时,观测量对 $\alpha$ 变化的灵敏度和 $\alpha$ 估计CRLB分布情况更为一致。

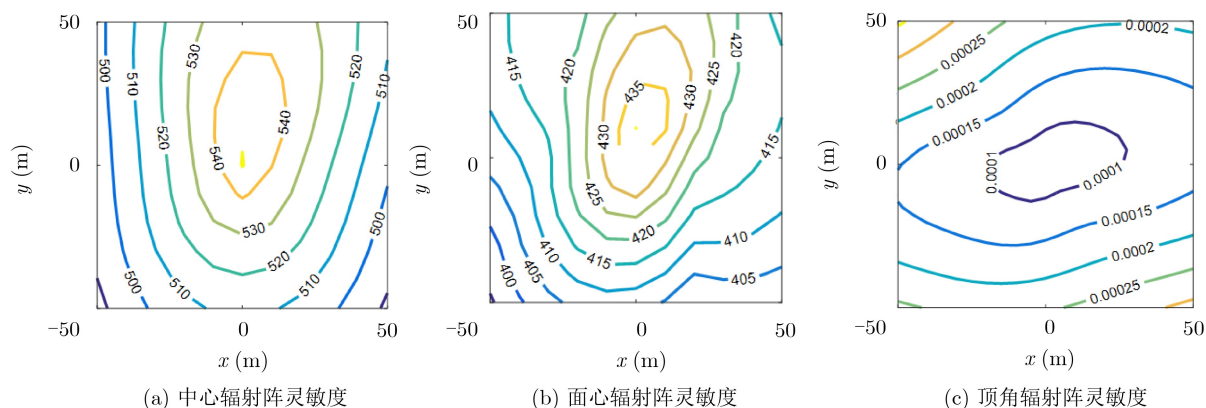


图8 观测量对 $\alpha$ 变化的灵敏度

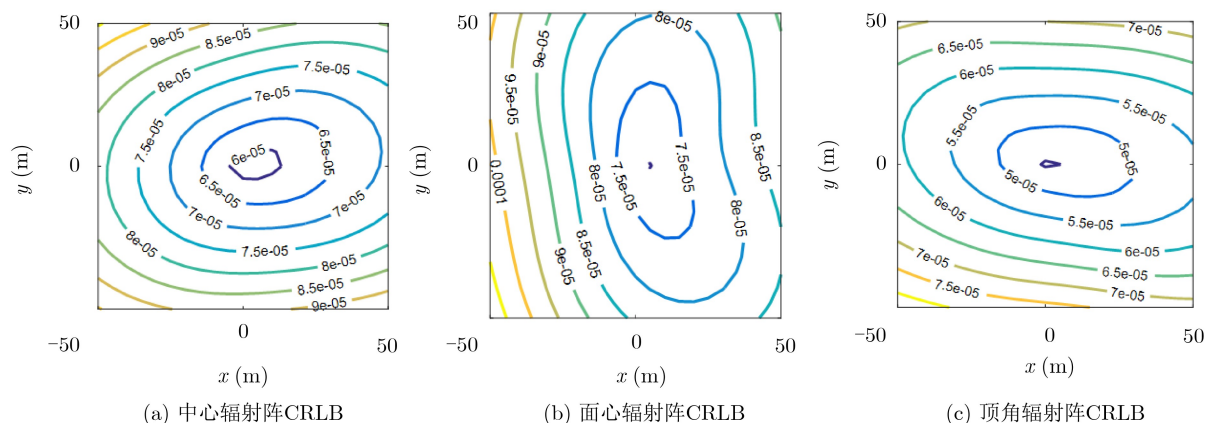


图9  $\alpha$ 估计CRLB

## 4 结论

本文针对基于PDOA着靶点参数估计问题提出了一种利用灵敏度分析来判断不同阵列类型定位性能的方法。通过灵敏度和CRLB的计算结果对比可以看出,灵敏度分析的方法可以较为直观和准确地体现不同阵列定位性能的差异,为工程设计提供了一种阵列结构选型和比较的方法。

### 参考文献

- [1] 魏国华, 吴嗣亮, 王菊, 等. 脱靶量测量技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 768–772, 847. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2004.06.018.  
WEI Guohua, WU Siliang, WANG Ju, et al. Overview of miss distance measurement technology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(6): 768–772, 847. doi:

- 10.3321/j.issn:1001-506X.2004.06.018.  
[2] 左燕, 周夏磊, 蒋陶然. 传感器位置误差下外辐射源雷达三维定位代数解算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 555–562. doi: 10.11999/JEIT190292.  
ZUO Yan, ZHOU Xiaolei, and JIANG Taoran. Algebraic solution for 3D localization of multistatic passive radar in the presence of sensor position errors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 555–562. doi: 10.11999/JEIT190292.  
[3] 王亚涛, 曾小东, 周龙建. 雷达间歇辐射对测向交叉定位性能的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(2): 452–457. doi: 10.11999/JEIT190110.  
WANG Yatao, ZENG Xiaodong, and ZHOU Jianlong. Analysis for effect of radar intermittent radiation on the performance of cross Longjian[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 452–457. doi:

- 10.11999/JEIT190110.
- [4] SU Ting and GAO Yong. TDOA estimation of dual-satellites interference localization based on blind separation[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(4): 696–702. doi: [10.21629/JSEE.2019.04.07](https://doi.org/10.21629/JSEE.2019.04.07).
- [5] MA Yongtao, WANG Bobo, PEI Shuyang, *et al.* An indoor localization method based on AOA and PDOA using virtual stations in multipath and NLOS environments for passive UHF RFID[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 31772–31782. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2838590](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2838590).
- [6] ZHOU Yifeng, LEUNG H, and YIP P C. An exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(6): 1560–1573. doi: [10.1109/78.599998](https://doi.org/10.1109/78.599998).
- [7] TAN Zilong, ZHANG Huaguang, SUN Jiayue, *et al.* Research on identification process of nonlinear system based on an improved recursive least squares algorithm[C]. Proceedings of 2019 Chinese Control and Decision Conference, Nanchang, China, 2019: 1673–1678. doi: [10.1109/CCDC.2019.8832530](https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8832530).
- [8] MENG Wei, XIE Lihua, and XIAO Wendong. Optimal TDOA sensor-pair placement with uncertainty in source location[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9260–9271. doi: [10.1109/TVT.2016.2516031](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2516031).
- [9] LUI K W K and SO H C. A study of two-dimensional sensor placement using time-difference-of-arrival measurements[J]. *Digital Signal Processing*, 2009, 19(4): 650–659. doi: [10.1016/j.dsp.2009.01.002](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2009.01.002).
- [10] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 基于TDOA定位的阵列布放结构研究[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(6): 29–36. doi: [10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.005](https://doi.org/10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.005).
- JIN Bonan, XU Xiaosu, ZHANG Tao, *et al.* Study of array structure for sensor placement in TDOA-based localization[J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2017, 4(6): 29–36. doi: [10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.005](https://doi.org/10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.005).
- [11] HU Dexiu, CHEN Shiwen, BAI Hang, *et al.* CRLB for joint estimation of TDOA, phase, FDOA, and Doppler rate[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(21): 7628–7631. doi: [10.1049/joe.2019.0581](https://doi.org/10.1049/joe.2019.0581).
- 王旭: 男, 1974年生, 讲师, 研究方向为高速实时数字信号处理.
- 庞义卓: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为无源定位技术.
- 白嘉豪: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 王文静: 女, 1987年生, 工程师, 研究方向为雷达信号处理.
- 魏国华: 男, 1977年生, 副研究员, 研究方向为雷达系统及其信号处理.

责任编辑: 陈倩