

卫星导航干扰源无人机定位观测路径规划方法

姚胤博, 许睿, 徐悦, 刘睿, 陈奇东

Method for configuring observation point paths for UAV satellite navigation interference source localization

YAO Yinbo, XU Rui, XU Yue, LIU Rui, and CHEN Qidong

引用本文:

姚胤博, 许睿, 徐悦, 等. 卫星导航干扰源无人机定位观测路径规划方法[J]. *全球定位系统*, 2024, 49(6): 72–83. DOI: [10.12265/j.gnss.2024097](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024097)

YAO Yinbo, XU Rui, XU Yue, et al. Method for configuring observation point paths for UAV satellite navigation interference source localization[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(6): 72–83. DOI: [10.12265/j.gnss.2024097](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024097)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024097>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

针对无人机防御的卫星导航干扰方法研究

Research on jamming methods of satellite navigation and positioning system in UAV defense

全球定位系统. 2024, 49(4): 121–126

加权K-Means与DRSS定位结合的GNSS干扰源定位方法

Localization for GNSS interference sources based on weighted K-Means combined with DRSS positioning

全球定位系统. 2024, 49(4): 113–120, 126

基于BDS的USV路径规划研究

Research on USV path planning based on BDS

全球定位系统. 2019, 44(6): 63–69

基于接收机位置信息的GNSS干扰源定位技术

GNSS interference localization technology based on position information of GNSS receivers

全球定位系统. 2020, 45(1): 51–55

网格化GNSS弱干扰源定位方法

Study of a grid GNSS weak interference positioning method

全球定位系统. 2020, 45(4): 58–62

卫星导航多干扰源测向定位技术及应用

Multi-interference source direction finding and positioning technology for satellite navigation and its application

全球定位系统. 2023, 48(1): 111–116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

卫星导航干扰源无人机定位观测路径规划方法

姚胤博^{1,2}, 许睿¹, 徐悦², 刘睿², 陈奇东²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘 要: 本文面向单无人机干扰源搜寻系统中观测点配置需求, 针对干扰源位置未知、测角设备存在盲区以及精度因子 (dilution of precision, DOP) 计算复杂问题, 比较了不同 DOP 与误差分布的吻合性, 提出合适的观测点配置方法辅助完成干扰源搜寻的工作. 交叉定位中观测点与干扰源的相对分布对定位结果存在影响, 因此引入 DOP 来描述分布的优劣. 将合适的 DOP 作为规划指标, 提出定步长方法、不定步方法、均匀方法提供监测观测点配置, 对不同初始点分布时各方法的配置效果做出比较. 并针对上述 3 种方法的缺陷提出改进的配置算法, 均通过仿真实验进行验证. 所提出的改进配置方法符合单无人机监测过程中顺序增加观测点的实际情况, 即使在初始角度分布极差时也可达到与理想精度较为接近的精度, 可满足监测定位工作的需求.

关键词: 干扰源定位; 精度因子 (DOP); 路径规划; 到达角方向定位; 观测点配置

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2024)06-0072-12

0 引言

GNSS 作为现今一种重要导航技术, 在各领域中发挥着重要的作用. 但 GNSS 容易受到电磁波干扰^[1-2], 为了能够有效应对干扰攻击, 快速处理干扰源, 相关研究已提出了针对抗干扰源的定位系统.

对于干扰源的定位本质上是基于各种观测信息对于干扰源的位置进行估计^[3-4], 包括到达时间定位法 (location by difference of times, TOA)、到达角定位法 (angle of arrival, AOA)、接收信号强度 (received signal strength indicator, RSS) 等方法^[5]. 由于实际进行观测时必然存在误差, 观测值的误差会传递到定位的结果, 该过程受观测点与干扰源之间的几何分布影响^[6-7], 合理的观测点设置可以改善定位精度^[8], 例如文献^[9-10]依据 AOA 定位的精度因子推算最优观测点分布. 但目前的观测点配置方法基于全局配置^[11-12], 需要提前预知干扰源位置以及可达观测点数量, 临时增加观测点会涉及到已有观测点的修改, 难以满足实际搜寻的需要.

本文以一种采用 AOA 定位的无人机干扰监测系统为背景, 对整个干扰源监测过程中观测点位置对最终定位精度产生的影响进行分析, 比较了几种用于衡量观测点位置分布优劣的指标. 将最合适的指标作

为依据, 提出符合实际限制条件的观测点规划方法, 不改变已有点的位置, 仅配置新的观测点, 最终达到需要的定位精度水平.

1 基于 AOA 的干扰源定位方法

AOA 定位法是通过阵列天线、空间谱等测向技术^[13]获得干扰源所发出信号到达观测点的入射角度, 结合观测点自身定位模块提供的位置信息进行干扰源的定位方法^[14]. 无人机干扰源监测系统在进行干扰源搜寻的工作中, 无人机搭载测向载荷获得干扰信号方向信息, 定位模块提供无人机所在的位置信息. 方向信息和位置信息共同组成观测数据, 无人机抵达不同观测点进行测向后, 获得多组观测数据组, 利用 AOA 算法进行干扰源定位. 由于测向模块的测向天线存在限制, 监测系统的测向结果并没有给出俯仰角, 因此本研究主要在二维平面内开展, 监测系统测向定位原理如图 1 所示.

以图 1 所示的 xOy 平面为研究场景, 采用的定位算法原理如下: 假设定位目标的干扰源位置为 (x_r, y_r) , 各观测点的坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, 将观测点 i 与干扰源连线与 x 轴正半轴之间的夹角记作 θ_i , 并将观测点 i 和观测点 j 对应的角 θ_i 和 θ_j 的差值记作 θ_{ij} , 将观测点 i 到干扰源之间的距离记作 d_i .

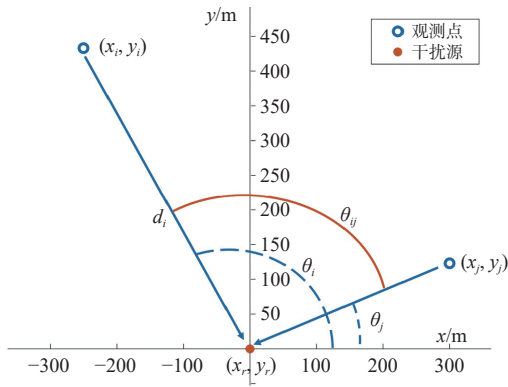


图1 测向定位原理图

根据观测点与干扰源之间的几何分布关系,可以得到下式:

$$\begin{cases} x_r - x_i = d_i \cos \theta_i \\ y_r - y_i = d_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, d_i 为两者之间的距离.

$$\frac{y_r - y_i}{x_r - x_i} = \frac{\sin \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (2)$$

将所有观测点的整理后得到如下的方程组

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \\ & \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \theta_i & -\sin \theta_i \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 y_1 - \sin \theta_1 x_1 \\ \cos \theta_2 y_2 - \sin \theta_2 x_2 \\ \vdots \\ \cos \theta_i y_i - \sin \theta_i x_i \end{bmatrix} \\ & \mathbf{X} = \begin{bmatrix} y_r \\ x_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

可得到干扰源在 x 、 y 平面上坐标的最小二乘解为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (4)$$

在测量值没有误差的前提下,上式的结果可以较为准确的反映干扰源的位置.但在实际监测过程中,测向误差不可避免,无人机自身的位置测量也存在误差,导致干扰源定位误差同时受测向误差与位置误差影响.同时,观测点与干扰源之间的相对分布也会影响干扰源的定位精度,极端情况如2个观测点与干扰源接近共线,即夹角差 θ_{ij} 约为 180° 时,较小的测角误差会带来极大的定位误差.

为了衡量观测点与干扰源的相对几何构型对定位精度的影响,以便展开后续的观测点配置工作,本文将精度因子 (dilution of precision, DOP) 的概念引入干扰源定位的过程中. DOP 是用于描述测量误差放大系数的一个量,常用于 GNSS 定位中,用于描述不同可见星分布情况下定位精度误差的放大量. DOP 越小,误差放大系数越低,定位精度越高.结合 AOA

定位原理, DOP 可以采用3种不同的计算方法.

1.1 位/距无关 DOP

位/距无关 DOP, 记为 DOP_1 , 与卫星导航中的 DOP 类似, 来源于定位方程中的几何矩阵. AOA 定位过程中所用的传递矩阵 $\mathbf{A}$ 如式 (3) 所示.

设 $\mathbf{H} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$, 则有

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i & -\sum_{i=1}^N \sin \theta_i \cos \theta_i \\ -\sum_{i=1}^N \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin^2 \theta_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

将 $\mathbf{H}^{-1}$ 记作 DOP_1 的特征矩阵 $\mathbf{P}_1$, 整理得到 DOP_1 表达式

$$\text{DOP}_1 = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{P}_1)} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sin^2 \theta_{ij}}} \quad (6)$$

式 (6) 中, N 表示观测点的个数. 该式展示出 DOP_1 仅与观测点数量和顺次观测点夹角 θ_{ij} , 与观测点位置以及观测点与干扰源距离无关.

1.2 距离相关 DOP

DOP_1 不能反映出观测点位置误差或观测点到干扰源的距离误差对定位结果的影响. 将多个干扰源的式 (1) 组合后, 进一步整理为

$$\begin{cases} (x - x_1) \tan \theta_1 = y - y_1 \\ (x - x_2) \tan \theta_2 = y - y_2 \\ \dots \\ (x - x_i) \tan \theta_i = y - y_i \end{cases} \quad (7)$$

对 (7) 求导, 整理可得

$$\begin{cases} -\tan \theta_1 dx + dy = (x - x_1) \sec^2 \theta_1 d\theta_1 \\ -\tan \theta_2 dx + dy = (x - x_2) \sec^2 \theta_2 d\theta_2 \\ \dots \\ -\tan \theta_i dx + dy = (x - x_i) \sec^2 \theta_i d\theta_i \end{cases} \quad (8)$$

经整理可得以下方程

$$\begin{aligned} & \bar{\mathbf{A}} d\mathbf{X} = \bar{\mathbf{B}} \\ & \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -\tan \theta_1 & 1 \\ -\tan \theta_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\tan \theta_i & 1 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} (x_r - x_1) \sec^2 \theta_1 d\theta_1 \\ (x_r - x_2) \sec^2 \theta_2 d\theta_2 \\ \vdots \\ (x_r - x_i) \sec^2 \theta_i d\theta_i \end{bmatrix} \\ & d\mathbf{X} = \begin{bmatrix} dx_r \\ dy_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

距离相关 DOP_2 的特征矩阵 $\mathbf{P}_2$ 如下:

$$\begin{aligned} & d\mathbf{X} = (\bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{A}})^{-1} \bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{B}}, \\ & \text{DOP}_2 = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{P}_2)} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{E}(d\mathbf{X}d\mathbf{X}^T))} \end{aligned} \quad (10)$$

假设各观测点所观测到的角度噪声为方差一致的高斯白噪声, 则 DOP_2 的表达式如下:

$$DOP_2 = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sin^2 \theta_{ij}}} \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (11)$$

式中: σ^2 是角度测量值的噪声方差.

观察上式可以发现, DOP_2 不仅与观测点和干扰源间的角度差有关, 也与观测点与干扰源间的距离有关, 距离越小 DOP_2 越小. 比较式 (6) 与式 (12), 发现 DOP_2 涉及夹角 θ_{ij} 部分与 DOP_1 相同, 是在 DOP_1 基础上乘以距离相关项, 即

$$DOP_2 = DOP_1 \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (12)$$

当所有观测点与干扰源距离相等, 即在以干扰源为圆心的圆周上, 则距离变成常数, 此时 DOP_2 的变化趋势则与 DOP_1 一致.

1.3 位置相关 DOP

DOP_1 中, 已经求过最小二乘算法的特征矩阵, 考虑到实际测量存在的测量误差, 设测量误差矩阵为 $\mathbf{e}$, 式 (3) 可变为以下的形式:

$$\mathbf{A}\mathbf{X}_T = \mathbf{B} + \mathbf{e} \quad (13)$$

令 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$, 在上式中对 θ 求偏导

$$\frac{d\mathbf{B}}{d\theta} = \text{diag}\left(\frac{db_1}{d\theta_1}, \frac{db_2}{d\theta_2}, \dots, \frac{db_n}{d\theta_n}\right) \quad (14)$$

其中 $\frac{db_i}{d\theta_i} = x_i \cos \theta_i + y_i \sin \theta_i$.

$\mathbf{e}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{P}_e$ 表达式为

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{E}(\mathbf{e}\mathbf{e}^T) = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_n) \sigma^2 \quad (15)$$

其中 $g_i = (x_i \cos \theta_i + y_i \sin \theta_i)^2$.

可以得到 DOP_3 的特征矩阵 $\mathbf{P}_3$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{X} &= \mathbf{X} - \mathbf{X}_T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (-\mathbf{e}) \\ \mathbf{P}_3 &= \mathbf{E}(\Delta \mathbf{X} \Delta \mathbf{X}^T) = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_e (\mathbf{H}^{-1} \mathbf{A}^T)^T \end{aligned} \quad (16)$$

则 DOP_3 为

$$DOP_3 = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{P}_3)} = \frac{\sqrt{l_{11} + l_{22}}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sin^2 \theta_{ij}} \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} l_{11} &= \sum_{i=1}^N (f_{11} \sin \theta_i - f_{12} \cos \theta_i)^2 g_i \\ l_{22} &= \sum_{i=1}^N (f_{21} \sin \theta_i - f_{22} \cos \theta_i)^2 g_i \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} f_{11} &= \sum_{i=1}^N \cos^2 \theta_i \\ f_{22} &= \sum_{i=1}^N \sin^2 \theta_i \\ f_{12} &= f_{21} = \sum_{i=1}^N \sin \theta_i \cos \theta_i \end{aligned} \quad (19)$$

DOP_3 的表达式最为复杂, 可以反映出观测点到干扰源距离对定位精度的影响, 但计算时无需干扰源到观测点间的距离, 仅需要角度和位置信息 (g_i).

1.4 2 点时各 DOP 间的关系

假设在以干扰源为原点的坐标轴上存在 2 个观测点, 并且两者到干扰源的距离相等 (均为 r), 此时 DOP_2 与 DOP_1 的关系如下:

$$DOP_2 = DOP_1 \sqrt{2} r \quad (20)$$

对于 DOP_3 , 将上述情况带入式 (16) 可得到

$$DOP_3 = \frac{\sqrt{l_{11} + l_{22}}}{\sin^2 \theta_{12}} \quad (21)$$

其中分母部分相关项代入距离 r 后可简化为

$$g_i = (x_i \cos \theta_i + y_i \sin \theta_i)^2 = \left(\frac{x_i}{\cos^2 \theta_i} + \frac{y_i}{\sin^2 \theta_i} \right)^2 = r^2 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} l_{11} &= \sum_{i=1}^N (f_{11} \sin \theta_i - f_{12} \cos \theta_i)^2 g_i \\ &= ((\cos^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_2) \sin \theta_1 \\ &\quad - (\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_2 \cos \theta_1) \cos \theta_2)^2 r^2 \\ l_{22} &= \sum_{i=1}^N (f_{21} \sin \theta_i - f_{22} \cos \theta_i)^2 g_i \\ &= ((\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_2 \cos \theta_1) \sin \theta_1 \\ &\quad - (\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2) \cos \theta_2)^2 r^2 \end{aligned} \quad (23)$$

最终, 式 (21) 分母部分可简化为

$$l_{11} + l_{22} = 2 \sin^2 \theta_{12} r^2, \quad (24)$$

将式 (24) 代入式 (21), 可得 DOP_3 表达式

$$DOP_3 = \frac{\sqrt{2 \sin^2 \theta_{12} r^2}}{\sin^2 \theta_{12}} = \sqrt{\frac{2}{\sin^2 \theta_{12}}} r = DOP_1 r \quad (25)$$

式 (25) 显示在 2 个观测点距干扰源等距时, DOP_3 同样正比于 DOP_1 , 是 DOP_1 的 r 倍, 与 DOP_2 相比, 是 DOP_2 的 $\sqrt{2}$ 倍.

DOP_1 的计算不受距离影响, 当 $N=2$ 时, DOP_1 形式如下:

$$DOP_1 = \sqrt{\frac{2}{\sin^2 \theta_{12}}} \quad (26)$$

显然,当 $\sin(\theta_{12} = \pm 90^\circ) = \pm 1$ 时, DOP_1 取得最小值 $\sqrt{2}$, 此时夹角应满足 $\theta_{12} = \pm 90^\circ$.

根据式 (20)、(24) 与 (25) 可知, 在 2 点到观测点距离相同的情况下, 3 种 DOP 成等比例关系, 而当观测点与干扰源位置形成的夹角为 $\pm 90^\circ$ 时, 3 种 DOP 取得最小值.

2 干扰源定位精度仿真分析

本部分通过仿真不同的观测点分布场景下 DOP 值和定位精度的变化情况, 分析 3 种 DOP 是否能反映定位精度.

2.1 2 点 DOP 与定位精度变化情况分析

首先进行 2 点定位的仿真, 仿真场景条件如图 2 所示, 在图 2 所示的 xOy 场景中, 设定干扰源位置位于坐标轴的中心, 观测点 O_1 、 O_2 到干扰源的距离 d_1 、 d_2 相等, 均为 500 m.

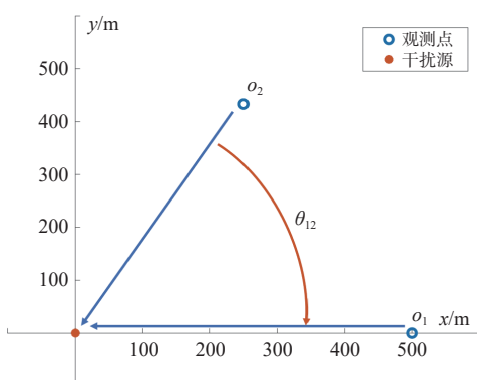


图 2 测向交叉定位图 ($\theta_{12}=60^\circ$)

令 O_1 始终位于 x 轴正半轴上, O_2 则以干扰源为圆心转动, 此时 $\theta_1=0$, $\theta_{12}=\theta_2$. 在仿真实验中改变 θ_{12} , 比较不同角度下各 DOP 和最终定位精度的变化情况.

在实际定位过程中, 定位误差的产生是因为测量值存在噪声, 观测噪声通过定位方程传递给最后的定位结果.

为了分析 DOP 值与误差大小的关系, 需要在观测数据存在噪声的前提下进行实验. 给模拟实验的观测值增加位置噪声和角度噪声, 此处以及后续的所有仿真中的噪声类型均为高斯白噪声, 其中位置噪声的正态分布形式为 $\sigma_x = \sigma_y \sim N(0, 10)$, 单位为 m; 角度噪声的正态分布形式为 $\sigma_\theta \sim N(0, 5)$, 单位为 $^\circ$. 进行多次定位, 取均方根误差 (root mean squared error,

RMSE) 作为定位精度的结果, 最后得到 θ_{12} 与 RMSE 和各 DOP 的图像如图 3 所示.

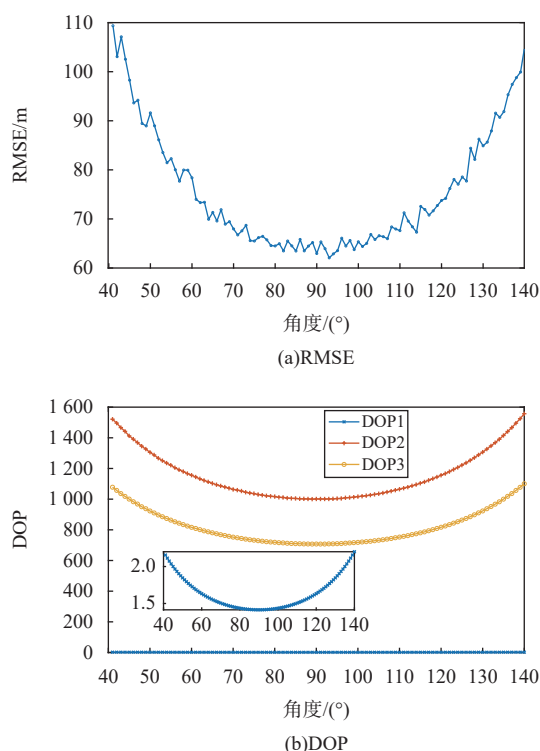


图 3 双观测点 RMSE 与 DOP 结果

由图 3 可知, 在夹角 θ_{ij} 介于 $40^\circ \sim 140^\circ$ 之间时, RMSE 与 DOP 的整体变化趋势接近, 但数值上差距较大: DOP_1 过小, 即使与测向误差综合也远远小于相应的定位误差; 而 DOP_2 和 DOP_3 的数值大小均以千计, 显然大于定位误差的数值.

但是在该角度区间内, 3 种 DOP 的变化趋势与干扰源定位误差的变化趋势基本一致. 夹角太小或太大时, 前后观测点与干扰源近似共线, DOP 与误差均急剧增加. 在夹角为 $80^\circ \sim 100^\circ$ 之间时, 定位误差较小, 最小值接近 65 m, 各 DOP 在此刻也相对较小.

上述的仿真分析说明 DOP 可以反映角度对定位精度的影响, 接下来需要研究其是否能反映距离的影响. 单从 DOP 值的表达式来看, DOP_1 无法反映距离对定位精度的影响, 而 DOP_2 和 DOP_3 均能反映.

为了比较距离对 DOP 和定位精度的影响, 改变 d_1 、 d_2 为 300 m 和 100 m, 重新进行仿真, 分别观察 3 种距离角度变化时定位精度和各 DOP 值的变化情况. 实验结果如图 4 所示.

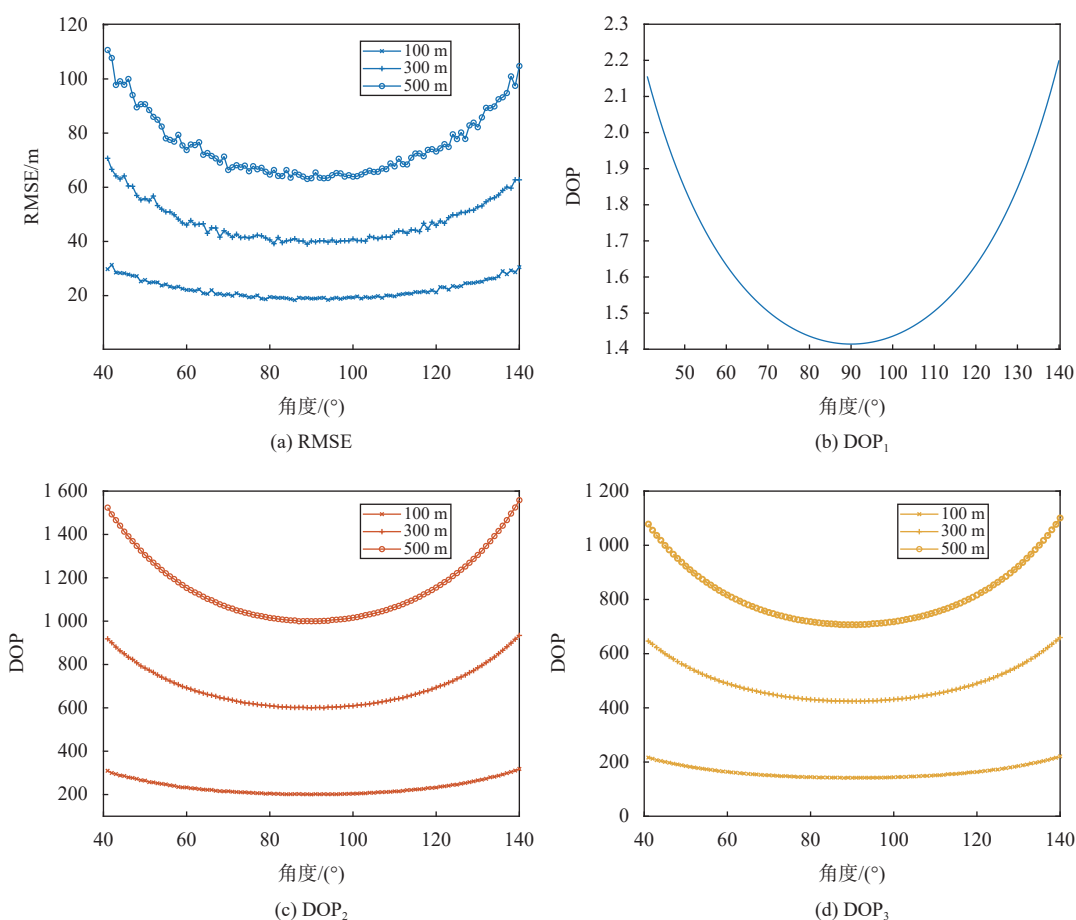


图 4 不同距离双观测点的 RMSE 和 DOP 结果

由图 4 可知,当观测点到干扰源的距离变化时,其定位结果的 RMSE 随着距离变小而变小,距离为 500 m 时最小定位 RMSE 约为 60 m;距离为 300 m 时最小定位 RMSE 约为 40 m;距离为 100 m 时,最小定位 RMSE 约为 19 m.此时 3 种距离下 DOP_1 均相同,其无法反映距离变化带来的定位误差变化。 DOP_2 和 DOP_3 随着距离变小而变小,可反映定位误差随距离的变化趋势。

结合上述的仿真实验发现,在 2 点定位时,3 种 DOP 值都可以反映角度对定位误差的影响,2 点夹角在 90° 附近区域时定位精度较好,与 1.4 中的推导结果一致,而当夹角接近 0° 或 180° 时,即 2 个观测点与干扰源近似共线时,定位误差增加,而观测点距干扰越远,误差增加情况越严重。

2.2 3 点 DOP 与定位精度变化情况分析

上一部分的模拟对 2 点定位时分布的 2 个基本因素的影响进行了分析,本部分绘制 DOP 值和定位精度分布图,对已有 2 点时继续增加新的观测点产生的影响进行比较。

分布图的绘制过程为:选定随机 2 个观测点为固定点,把以干扰源为中心、附近范围 $2\,000\text{ m} \times 2\,000\text{ m}$

的区域划分为 101×101 的点阵.将点阵中各点分别与固定点组合,进行多次交叉定位解算。

为了避免特殊性,绘制分布图时选择 2 个到干扰源距离不同的观测点作为 2 个固定点,具体分布形式图 5 所示。

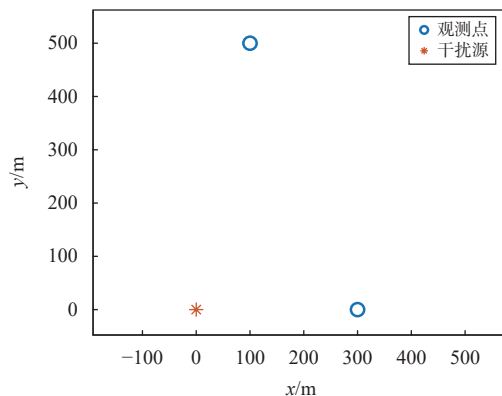


图 5 固定点位置情况

将 3 种 DOP 值和定位精度等数值以热力分布图的形式呈现出来,可较为直观的体现 3 种 DOP 值是否能够衡量定位结果的误差,继而确认最适合作为优化定位误差的指标。

此时分布图结果如图 6 所示。

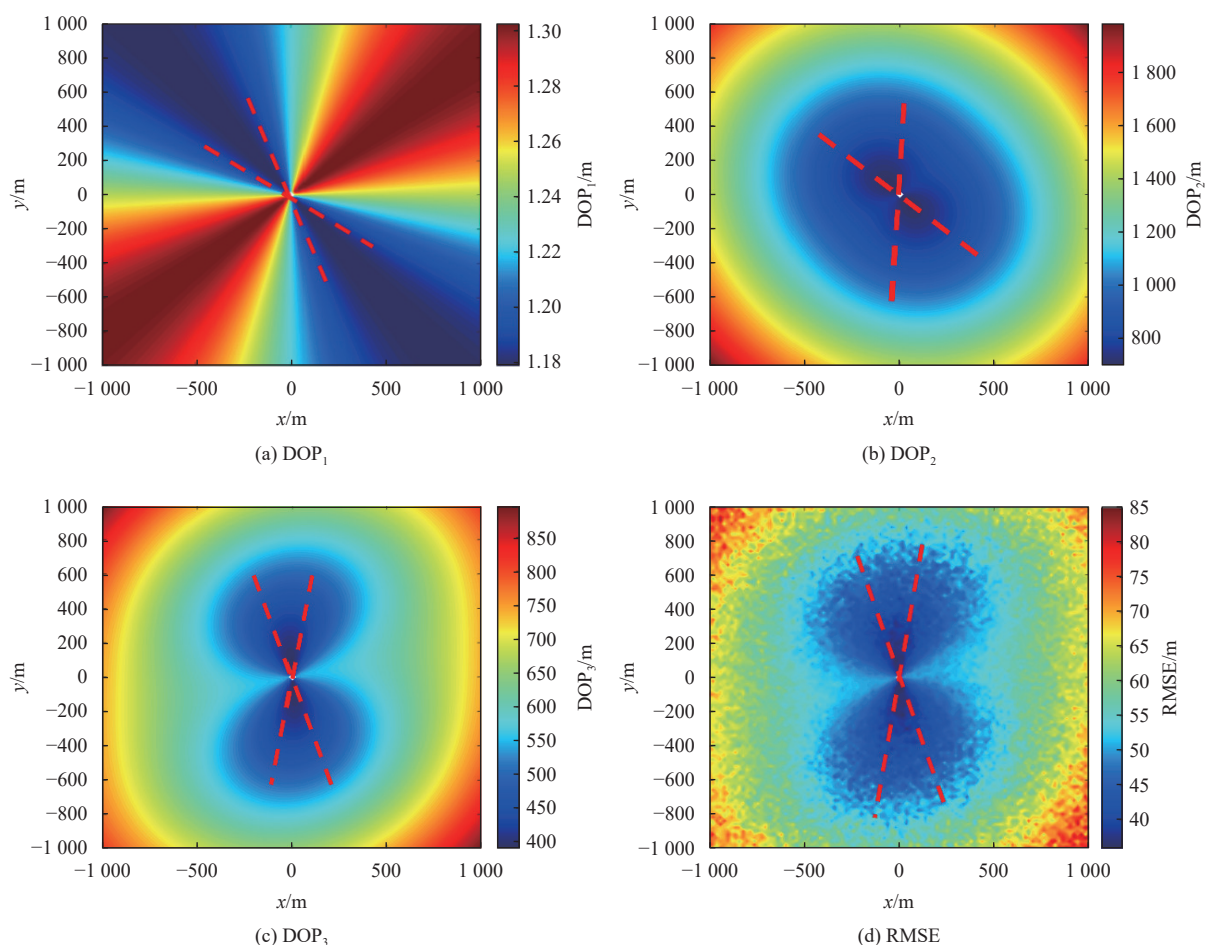


图6 定位误差与DOP值热力分布图

由图6可得出以下2个方面的结论:

1) 从DOP分布形状看, DOP_3 与RMSE最近似。距离干扰源500 m以内处, DOP_3 与RMSE分布均为沙漏形状, 在角度约为 100° 与 280° 处最小, 在 10° 与 190° 处最大。图6(c)、(d)中红色虚线所围成的区域即对应 DOP_3 和RMSE最小的区域。

DOP_1 和 DOP_2 的分布均与RMSE分布相差较大。 DOP_2 虽然能反映距离的影响, 但是不同角度间的区别较小, 同时 DOP_2 最小的区域与RMSE最小的区域无法对应; DOP_1 则无法反映距离的影响。以上说明当观测点到干扰源的距离不同时, DOP_1 和 DOP_2 均会受到较大的影响。

2) 从DOP的具体数值看, DOP_2 、 DOP_3 较大, 数量级可达 10^3 。虽然 DOP_3 大小分布和RMSE结果对应, 但要通过其数值和测量误差的方差计算得到定位的RMSE比较困难。相比之下, DOP_1 的大小虽然较为合理, 但是由于其分布本身就与RMSE有较大差距, 因此也无法进行合适的计算。

根据分布图的变化, 总结几何分布对定位精度的影响如下: 观测噪声不变时, 观测点与干扰源间的角

度、距离均会对最终定位精度产生影响。角度存在一个最优角度轴, 在该轴线附近一定范围内的角度均能获得较好的定位精度; 在角度确定的前提下, 观测点距离干扰源越近, 定位结果精度越高。

综上所述, DOP_1 可以反映角度对定位误差的影响, 但是无法反映距离的影响; DOP_2 可以反映角度和距离对定位误差的影响, 但是某些情况下无法准确反映; DOP_3 的分布图与RMSE结果最为符合, 对实际定位误差的描述最为准确。

3 无人机观测路径规划算法

已有研究显示, 若所有观测点与干扰源保持相同距离, 并且分布为以干扰源为圆心的内接多边形时定位效果最好^[15]。然而, 由于干扰源位置未知, 并且难以提前确定需要多少个观测点, 平均分布观测点的规划方法较难实现。

此外, 在实际运行过程中, 观测点过于接近干扰源或将因远近效应导致测向模块失效。因此, 在实际规划时需考虑以下限制条件:

1) 无干扰源位置信息时, 初始2个观测点位置无

法指定, 近似为随机位置.

2) 监测行动实际由 1 台移动站完成, 后续新增观测点不能改变已有观测点位置, 观测点的配置是按顺序增加的过程.

3) 规划监测载体路径时, 设置观测点到干扰源的最小距离, 观测点与干扰源间的距离不得小于该限制距离.

3.1 DOP₃变化规律推导

在使用 DOP 值描述定位精度的过程中, DOP₁ 仅能对角度的影响做出反映, DOP₂ 和 DOP₃ 可以同时反映角度和距离的影响, 但 DOP₂ 的计算过程中需要重新计算距离, 且描述精度不及 DOP₃. 理论上说, 使用 DOP₃ 指导观测点规划的效果最好.

下面将对增加观测点时 DOP₃ 的变化特性进行分析. 根据式 (16), DOP₃ 的分子部分记作 D_{num} , 分母记作 D_{den} , 即

$$\begin{aligned} D_{\text{num}} &= \sqrt{g_1(f_{11}\sin\theta_1 - f_{12}\cos\theta_1)^2 + \dots + g_1(f_{21}\sin\theta_1 - f_{22}\cos\theta_1)^2 + \dots} \\ D_{\text{den}} &= \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sin^2\theta_{ij} \\ DOP_3 &= \frac{D_{\text{num}}}{D_{\text{den}}} \end{aligned} \quad (27)$$

在本文提出的定位环境中, 每次进行规划时, 先前已有观测点的位置和角度都被视为已有的常值, 因此对 DOP₃ 进行求导时, 可仅把最新的规划点 θ_x 作为未知数进行求导.

$$D_3' = (D_{\text{num}}' \times D_{\text{den}} - D_{\text{num}} \times D_{\text{den}}') / (D_{\text{den}})^2 \quad (28)$$

对式 (22), 由于分母始终为正数, 此时仅考虑分子部分.

令

$$D_d = D_{\text{num}}' \times D_{\text{den}} - D_{\text{num}} \times D_{\text{den}}' \quad (29)$$

假设 N 为 1 个较大值时, 存在观测点 m_1 , 其角度 θ_{m_1} 使 DOP₃ 取到最小值, 则有

$$\begin{aligned} D_d(\theta_{m_1}) &= 0 \\ \lim_{x \rightarrow \theta_{m_1}^-} D_d(x) &= 0 \\ \lim_{x \rightarrow \theta_{m_1}^+} D_d(x) &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

上式中, 第 1 个极限式数值小于 0, 第 2 个极限式数值大于 0, 两式符号相反.

此时再增加 1 个新观测点 m_2 , 其对应角度为 θ_{m_2} . 由于 N 为较大值, 因此 D_d 中的求和项目近似相等, 仅影响与 D_{num}' 中与 $2\theta_x$ 有关的项. 当 $\theta_{m_2} = \theta_{m_1} + 90^\circ$ 时, 有

$$\begin{aligned} \cos 2\theta_{m_2} &= -\cos 2\theta_{m_1} \\ \sin 2\theta_{m_2} &= -\sin 2\theta_{m_1} \\ \sum_{i=1}^{N-1} \sin 2\theta_{im_2} &= \sum_{i=1}^{N-2} (\sin 2\theta_{im_2} + \sin 2\theta_{m_1m_2}) \\ &= -\sum_{i=1}^{N-2} \sin 2\theta_{im_1} \end{aligned} \quad (31)$$

上式中 θ_{im_2} 、 θ_{im_1} 和 $\theta_{m_1m_2}$ 与 1.1 中规定一致, 分别表示下标对应角度的差, 通过观察可得

$$\dot{D}_d(\theta_{m_2}) \sim -\dot{D}_d(\theta_{m_1}) = 0 \quad (32)$$

对于 $2\theta_x$, 其角度增加 180° 之后变化趋势相反, 此时 θ_{m_2} 为 DOP₃ 的 1 个极小值点, 在 θ_{m_2} 可近似取得 DOP₃ 的最小值, 此时有

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \theta_{m_2}^-} D_d(x) &= 0 \\ \lim_{x \rightarrow \theta_{m_2}^+} D_d(x) &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

同样的, 第 1 个极限式数值大于 0, 第 2 个极限式数值小于 0, 两式符号相反.

此时, m_2 对应的 DOP₃ 最小, 可以认为是新增的最优观测点, 并且 m_1 和 m_2 之间的角度差为 90° . 在观测点 m_2 的基础上继续增加观测点时, 后续最优观测点也会出现类似情况, 其角度仍与上一个最优观测点相差 90° . 按顺序配置观测点时, 当观测点的总数增加到一定大小, 新配置的观测点角度与最后一个观测点角度差会始终为 90° .

3.2 观测点规划方法

结合推导结果和限制条件, 对无人机监测系统在实际观测过程中的观测点提出 3 种规划方法:

1) 定步长法: 规定观测点数量单次规划移动步长, 以最新观测点为圆心, 计算向所有方向前进 1 个步长后得到的新观测点的 DOP₃ 的大小, 选择 DOP₃ 最小的点作为新的观测点. 重复上述步骤直至观测点数量达到限制.

2) 不定步长法: 根据初始观测点获得的粗定位结果, 在以粗定位结果为中心, 定位盲区距离为半径的圆上选择 DOP₃ 最小的角度轴上的点, 该点作为新的观测点, 重复上述步骤直至观测点数量达到限制.

3) 均匀分布法: 根据初始观测点获得粗定位结果, 直接以该粗定位结果为中心进行目标数量的均匀分布配置进行定位.

图 7 展示了 3 种方法在没有噪声时的规划结果. 第 1 种方法以螺旋形式向着干扰源的位置逐渐靠近; 第 2 种方法则是在快速接近干扰源之后形成以干扰

源为中心的正方形分布.第3种方法则表现为获得粗定位结果后,舍弃初始点,直接进行均匀分布配置.

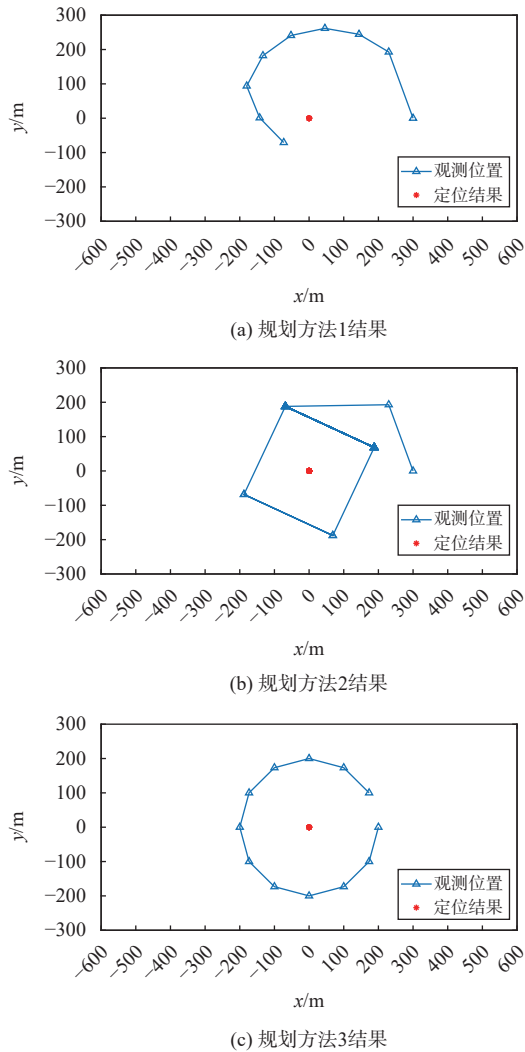


图 7 无噪声规划效果

规划方法 2 得到的结果与前文推导得到的结论符合,即当观测点数量足够多时,新增观测点与上一个点的夹角呈 90° .结合 1.4 与 3.1 中的推导,在顺序配置观测点的前提下,可将 DOP_3 简化为 DOP_1 ,或是直接简化 DOP 值的计算,采用基于最新点增加 90° 的方式进行后续配置.

图 7 的结果是在没有噪声的环境下产生的,但实际测量数据一定存在噪声.当存在噪声时,这 3 种方法在初始 2 点的角度较好时,可获得定位精度理想的观测点配置结果.但是由于每次配置都需遍历各角度的 DOP 值,计算量较大.

如图 8 所示,在遇到初始 2 点分布较差(即 $\theta_{ij} < 20^\circ$)时,配置效果较差,导致最终定结果准确性受到影响.

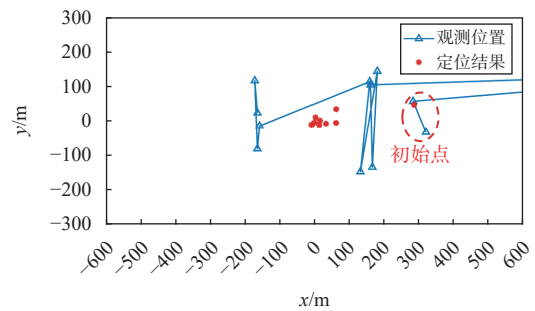


图 8 初始点分布较差时的规划效果

基于上述规划方法计算量大以及对分布不好的初始观测点效果较差的 2 项缺陷,提出优化方法思路如下:

- 1) 根据初始观测点得到粗定位结果.
 - 2) 不计算 DOP 值,直接以到粗定位结果距离减半、角度增加 90° 的原则增加新观测点.
 - 3) 以新观测点重新计算定位结果,与原先的定位结果比较.若定位结果的距离差距较大,则认为原先的定位结果与观测点不可靠,剔除该定位结果和未参与构建新点的观测点.
 - 4) 以新得到的定位结果和观测点为基础继续增加观测点,重复 2、3 步骤,直到观测点数量达到要求.
- 算法流程图如图 9 所示.

相较于原来的 3 种规划方法,该算法在增加新点时简化了计算 DOP 值的过程,使得规划的计算量降低,并且通过比较前后的定位结果差距,将对定位精度贡献较差的观测点舍去,使得定位精度和规划速度都得到提升.

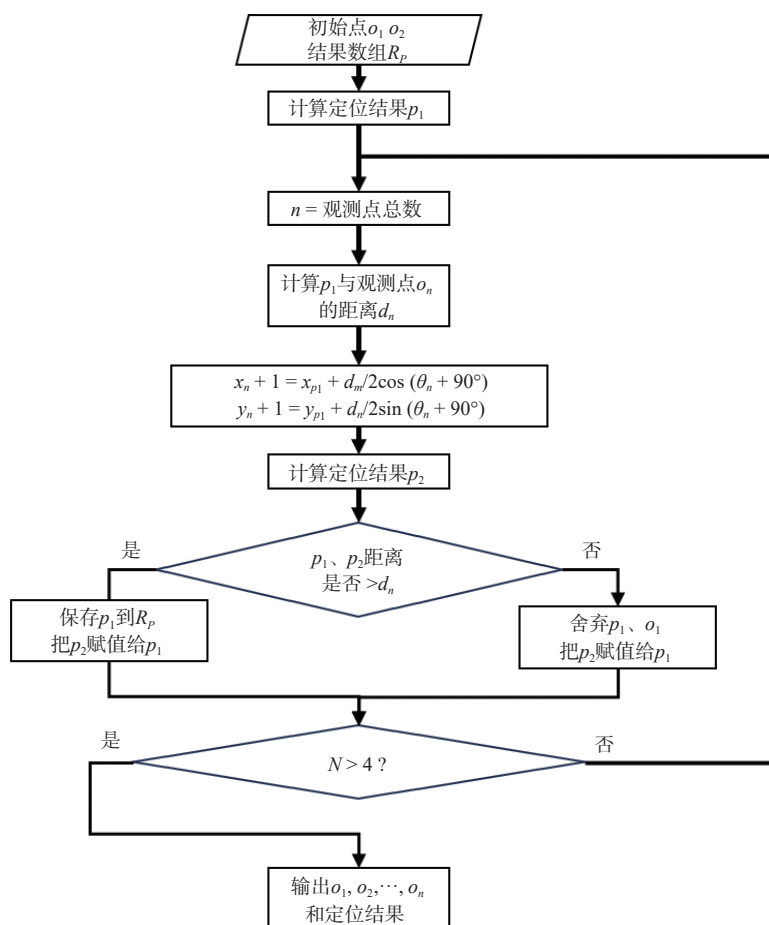


图 9 算法流程图

3.3 各规划方法效果比较

为了比较观测点配置后定位精度的效果, 现对上述的方法进行误差仿真实验. 实验中, 有干扰源设置为坐标系中心, 初始 2 点的分布包括以下 4 种情况:

情况 1: (500, 0), (536, 449)

情况 2: (300, 0), (230, 193)

情况 3: (1 500, 0), (643, 766)

情况 4: (300, 0), (295, 52)

这 4 种情况的研究主要是为了比较 4 种方法在不同角度和距离时的精度情况. 各情况中初始点相对于干扰源的分布情况如图 10 所示.

设置定步长法步长为 100 m, 定位盲区为 200 m. 所有观测数据增加相同的角度噪声与位置噪声, 进行 500 次仿真实验. 作为比较, 将真实干扰源位置为中心的均匀分布的定位结果作为理想精度.

实验结果如表 1 和图 11 所示.

由表 1 可以看出, 对于定步长方法, 当其初始观测点距离较远时, 不论角度如何, 得到的 RMSE 均较差; 距离较近时, 即使初始角度较差, 仍然能得到良好的 RMSE. 不定步长方法在角度良好时效果良好,

但距离过远时依然会受到影响; 角度较差时, 不管距离如何, 不定步长法的 RMSE 都急剧增加.

均匀方法的问题相似, 在初始角度较差时定位精度下降的更明显, RMSE 接近 6 000 m, 此时可以认为已经无法完成定位工作. 相比之下, 优化方法受到距离和角度的影响均较小, 能够适合各种初始点分布情况.

除了定位精度适应性方面的差距, 从单次运行时间看来, 定步长和不定步长的方法由于每次增加新的

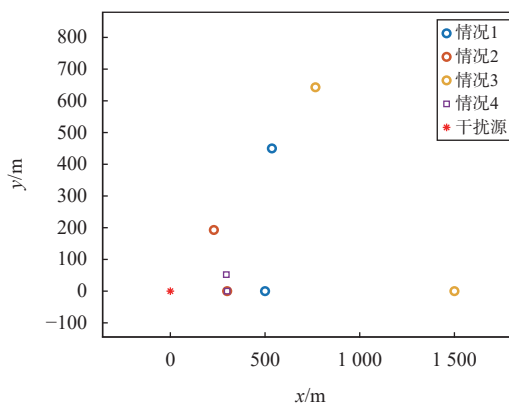


图 10 仿真实验点的分布图

表 1 不同情况不同规划方法效果比较

方法	初始点情况	最终RMSE/m	单次运行时间/s
定步长	1	39.64	0.014 307
	2	13.34	
	3	91.71	
	4	15.65	
不定步长	1	16.19	0.017 772
	2	11.29	
	3	26.83	
	4	326.52	
均匀	1	13.17	0.000 499
	2	10.09	
	3	31.59	
	4	5 949.46	
优化	1	16.49	0.000 351
	2	12.63	
	3	16.29	
	4	12.72	
理想	-	9.64	-

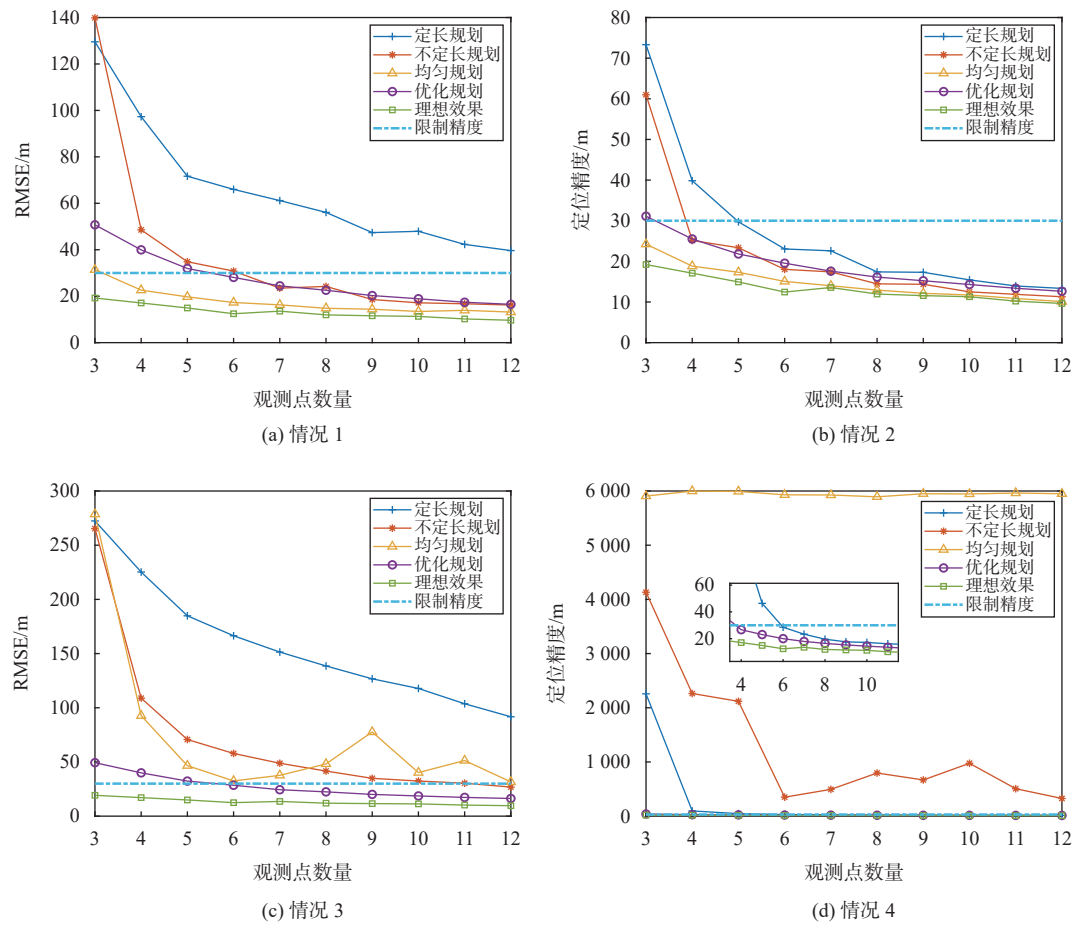


图 11 各情况规划方法的定位精度

观测点都需要重新计算 DOP, 因此运行速度较慢. 优化方法省略了计算过程, 直接通过增加 90° 来确定新的观测点, 明显提高了运行速度.

由图 11 可知, 角度合适的前提下, 初始点距离干扰源较远时, 定步长方法的 RMSE 与其它的方法差距较大, 均匀规划的 RMSE 结果出现了一定的波动; 距离干扰源较近时, 所有方法均能达到较好的精度, 但由于前 2 种方法不会舍弃初始观测点, 在新增观测点数量较少时效果较差.

角度不合适的前提下, 不定步长规划和均匀规划的 RMSE 结果会显著增加, 尤其是均匀规划; 定步长规划在只有 3~4 个点时的 RMSE 显著增加, 观测点数量增加之后逐渐恢复到正常水平. 只有优化规划始终在该情况下保持正常效果, 因此认为优化规划在距离较远、角度较差的初始情况中也有良好的规划效果.

4 结 论

本文对 2 点以及多点交叉定位时观测点与干扰源的相对分布情况对干扰源定位精度产生的影响展开仿真分析, 给出 3 种 DOP 值来描述几何构型的好坏. 在对 2 点分布情况的分析中发现, 2 点角度差为 $80^\circ \sim 100^\circ$ 时, 定位误差最小; 2 点距离干扰源的距离越近, 定位误差越小. 在多点定位的分布图绘制中, DOP 值和 RMSE 分布情况也符合上述规律, 并且 DOP₃ 最能描述定位精度的变化.

由于实际的干扰源监测中存在已有观测点无法更换、测向盲区等限制, 因此基于实际的限制条件先提出 3 种观测点规划方法: 定步长法、不定步长法、均匀分布法, 进行测试后发现存在计算量大以及初始点角度差时定位效果不好的问题, 因此在 3 种方法的基础上提出优化方法, 能够较好地解决上述问题. 经过仿真比较发现, 本文提出的优化规划可以在无法改变原有观测点的基础上获得较好的结果, 定位精度足以满足干扰源监测系统的精度要求.

参考文献

- [1] 靳睿敏, 郭艺, 杨会赞, 等. 基于导航接收机的 GNSS 弱干扰检测识别技术 [J]. 全球定位系统, 2022, 47(6): 91-95.
- [2] 陈立军, 潘正军, 陈孝如. 无人机 GPS 欺骗干扰攻击对策 [J]. 全球定位系统, 2023, 48(4): 91-98.
- [3] 吴涛, 胡艳霞, 田甜, 等. GNSS 干扰定位技术分析 [J]. 全球定位系统, 2023, 48(5): 103-111.
- [4] 张治, 卢鸿谦, 班晓军, 等. 基于 MEMS/GNSS 的多机协同无源定位 [J]. 光学精密工程, 2021, 29(12): 2844-2854.
- [5] 聂大惟, 朱海, 吴飞, 等. 基于 RSSI 概率分布与贝叶斯估计的加权定位方法 [J]. 全球定位系统, 2022, 47(2): 52-59.
- [6] 严宏基, 舒红, 孙红星. 几何精度衰减因子对两种到达时间差算法定位精度的影响分析 [J]. 测绘地理信息, 2020, 45(3): 61-65.
- [7] FANG X P, LI J B, ZHANG S X, et al. Optimal AOA sensor-source geometry with deployment region constraints [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(4): 793-797. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3144152
- [8] HAMDOLLAHZADEH M, AMIRI R, BEHNIA F. Optimal sensor placement for multi-source AOA localisation with distance-dependent noise model [J]. IET radar, sonar & navigation, 2019(6): 13. DOI: 10.1049/iet-rsn.2018.5426
- [9] 王国刚. 两站测向交叉定位相对误差几何稀释度研究 [J]. 舰船电子工程, 2015, 35(12): 58-61.
- [10] 罗双喜. 多站交叉定位相对 GDOP 及其测向站分布问题研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(2): 7-11.
- [11] PANWAR K, FATIMA G, BABU P. Optimal sensor placement for hybrid source localization using fused TOA-RSS-AOA measurements [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2023, 59(2): 1643-1657. DOI: 10.1109/TAES.2022.3202879
- [12] 聂文梅, 宋晓霞. 基于自适应粒子群优化算法的无线传感器网络覆盖控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(4): 459-464.
- [13] 姚志成, 许佳诺, 杨剑, 等. 一种改进的干涉仪-MUSIC 联合测向算法 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(11): 240-247.
- [14] 赵辰乾, 王松波, 刘益辰. 地球表面测向交叉定位算法 [J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(5): 86-89.
- [15] 王本才, 何友, 王国宏, 等. 多站无源定位最佳配置分析 [J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(10): 1251-1267.

作者简介

姚胤博 (2000—), 男, 硕士, 研究方向为卫星导航干扰源定位. E-mail: sz2203108@nuaa.edu.cn

许睿 (1983—), 女, 副教授, 研究方向为卫星导航抗干扰/抗欺骗研究. E-mail: ruixu@nuaa.edu.cn

徐悦 (1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为卫星导航对抗等. E-mail: 951061712@qq.com

刘睿 (1989—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为卫星导航对抗等. E-mail: 15375516858@163.com

陈奇东 (1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为卫星导航对抗、电波环境应用等. E-mail: chen-qd0929@126.com

Method for configuring observation point paths for UAV satellite navigation interference source localization

YAO Yinbo^{1,2}, XU Rui¹, XU Yue², LIU Rui², CHEN Qidong²

(1. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics College of Automation Engineering, Nanjing 211106, China*; 2. *China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China*)

Abstract: This paper addresses the optimization of observation point configuration in a single UAV interference source search system, focusing on unknown interference source positions, goniometric equipment blind spots, and complex calculations of dilution of precision. It compares various dilution of precision with error distribution and proposes a method to enhance the search process. By using dilution of precision to evaluate distribution effectiveness, the paper presents three methods: fixed-step, variable-step, and uniform. These methods are compared under different initial distributions. Based on the shortcomings of the three methods above, an improved algorithm is proposed and validated through simulations. This algorithm supports the sequential addition of observation points, achieving near-ideal accuracy even with poor initial angle distributions, thereby meeting monitoring and localization requirements.

Keywords: interference source localization; accuracy factor; path planning; angle-of-arrival direction localization; observation point configuration

~~~~~  
(上接第 24 页)

## Comparative evaluation of observable specific bias performance of BDS-3 new frequency

LI Yiwen<sup>1</sup>, ZHAO Ziwen<sup>1</sup>, CHEN Jijun<sup>1</sup>, LIANG Yaru<sup>1</sup>, WEI Kai<sup>2</sup>, WANG Dixing<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>

(1. *Institute of Space Science and Technology, Shandong University, Weihai 264209, China*; 2. *Qilu Institute of Aerospace Information, Chinese Academy of Sciences, Jinan 250100, China*)

**Abstract:** Observable-specific signal bias (OSB), a new type of code bias, is important for improving the positioning accuracy of BeiDou navigation satellite system (BDS). This paper compares the performance of OSB products released by the Chinese Academy of Sciences (CAS) and Wuhan University (WHU) based on the new BDS-3 frequency combination B1C/B2a at the MGEX station. It is found that the stability of the OSB products of CAS is generally better than that of WHU products and has an impact on the localization performance. The PPP experiments using CAS products have better pseudorange and carrier residuals than WHU products, and their localization accuracies are also slightly better than WHU products. Moreover, the use of OSB products can improve the PPP convergence time and get higher positioning accuracy more quickly. And the effect of OSB product fluctuation on the positioning performance is analyzed, and it is found that during the fluctuation of CAS product, its pseudo-distance, carrier residual, and positioning performance all decrease.

**Keywords:** BDS-3; pseudo-range positioning; precision point positioning; OSB; performance evaluation.