

文章编号: 2095-4980(2021)04-0628-08

基于分布式无人机监测的干扰源直接定位

赵高峰¹, 陈若迅¹, 李莹莹¹, 李建峰^{*1,2,3}

(1.南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 211106; 2.电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003; 3.南海海洋资源利用国家重点实验室(海南大学), 海南 海口 570228)

摘要: 目前大部分直接定位方法主要针对窄带信号, 为此提出了一种基于分布式无人机(UAV)平台的宽窄带信号直接定位(DPD)方法。首先在频域对多个无人机平台的接收数据进行合成, 基于多个频点建立和信源位置直接相关的代价函数; 然后, 将监测区域进行网格化处理得到目标信源的位置; 最后, 多无人机移动监测, 并不断缩小监测区域, 对多次定位结果聚类分析, 得到最终定位结果。通过仿真验证, 本方法的定位性能明显优于传统的定位方法。同时实测数据的处理结果表明, 本文所提方法定位性能优于改进的到达时间差(TDOA)定位方法。

关键词: 直接定位; 多无人机; 聚类分析; 辐射源定位

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021046

Direct location of interference sources based on distributed UAV monitoring

ZHAO Gaofeng¹, CHEN Ruoxun¹, LI Yingying¹, LI Jianfeng^{*1,2,3}

(1.College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China; 2.State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China; 3.State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea(Hainan University), Haikou Hainan 570228, China)

Abstract: Most of the current direct positioning methods are mainly for narrow-band signals. A wide/narrow band signal Direct Position Determination(DPD) method based on distributed Unmanned Aerial Vehicle(UAV) platform is proposed. Firstly, the received data of multi-UAV platforms are synthesized in frequency domain, and a cost function directly related to the source location is established based on multiple frequency points. Secondly, the monitoring area is gridded to determine the location of the target source. Finally, the multi-UAV movement monitoring is carried out, and the monitoring area is continuously reduced. The final positioning result is obtained by clustering analysis of multiple positioning results. Simulation results show that the localization performance of this method is obviously better than that of traditional localization methods. The processing results of the measured data show that the proposed method has better positioning performance than the improved Time Difference of Arrival(TDOA) positioning method.

Keywords: Direct Position Determination; multi-Unmanned Aerial Vehicle; clustering analysis; emitter location

无线定位是民用与军用领域中一个非常重要的研究方向, 目前已有多种无线定位算法, 其中以两步定位算法关注度最高。传统的两步定位方法首先从接收信号中提取测量参数, 这些测量参数包括到达角(Angle of Arrival, AOA)、到达时间(Time of Arrival, TOA)和到达时间差等; 然后利用提取的测量参数建立关于目标位置的方程进行求解^[1-2]。但两步定位方法中, 参数求解与目标定位是在 2 个分离的步骤中进行, 会造成数据处理过程中位置信息损失, 引入更多的误差。此外, 在传统两步定位中, 存在测量参数值可能与相应的发射机不匹配以及低信噪比下定位性能差的问题^[3-4]。为了提高两步定位算法精确度, 文献[5]提出了一种基于时延补偿的改进 TDOA 定位

收稿日期: 2021-01-31; 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61971217; 61601167); 江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z013); 中国博士后科学基金资助项目(2020M681585); 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室(CEMEE 2021Z0101B); 南海海洋资源利用国家重点实验室(海南大学)(MRUKF2021033)

*通信作者: 李建峰 email:lijianfeng@nuaa.edu.cn

算法。该算法通过提升时延估计精确度，提高了定位精确度，但无法从根本上克服两步定位的不足。与传统两步定位不同的是，直接定位(DPD)技术利用信号数据域信息直接完成目标位置估计，不再进行定位参数估计^[6-7]，避免了两步定位方法中因为两步分离造成的信息损失，具有更高的定位精确度。此外，当存在多个信源时，直接定位算法解决了传统两步定位方法中的参数匹配问题^[8]，成为目前无线定位中的研究热点。

DPD 定位方法不需要估计参数，但对信号建模时，依然需要考虑辐射源位置信息蕴含在哪些变量中，根据定位场景选择合适的信息类型。文献[9-11]提出了几种基于 TDOA 和到达频差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)的直接定位方法，它们同样采用了多个运动的单传感器截获静止辐射源信号，考虑了 TDOA 和 FDOA 信息，直接建立了截获信号和辐射源位置之间的模型，通过穷尽搜索法实现直接定位。文献[12]在观测站和辐射源相对静止时，提出了一种基于 TDOA 的多站直接定位方法。文献[13]提出了一种新的使用多天线阵列的(DPD)直接定位方法。该方法利用阵列接收信号的互相关矩阵直接估计辐射源的位置。文献[14]提出了一种利用角度和多普勒频移中嵌入的位置信息对多个固定发射机进行 DPD 的算法。文献[15]针对多阵列下存在通道幅相差的情况，提出了一种改进直接定位算法。文献[16]提出了一种基于小生境拓扑结构改进矢量粒子群算法的直接定位算法。

以上这些直接定位算法主要针对窄带信源，随着雷达与通信技术的发展，调制类宽带信号以其承载信息量大、抗干扰能力强等优势，得到了愈来愈广泛的应用，但目前针对宽带信号的直接定位算法还比较少。文献[17]是最早考虑宽带信号的直接定位，它建立了运动多站截获宽带信号的模型，利用 TDOA 和 FDOA 两个信息类型构建了直接定位代价函数，将直接定位的应用拓展到了宽带信号。文献[18]提出了一种基于 TDOA 的最大似然直接定位方法，该方法基于连续信号模型，可实现对宽带或窄带信号目标的有效定位，且分别考虑了波形未知和波形已知、发射时间未知两种情况。文献[19]针对宽带信号研究了相干和非相干两种直接定位方法。利用这两种预处理技术，可以提高宽带处理增益。

针对以上问题与分析，本文提出了一种基于分布式多无人机监测的频域直接定位方法。基于多无人机平台，构建了多监测节点下的接收信号模型。将信号进行频域变换，并将多个监测节点的数据进行合成。利用本文的频域直接定位算法进行空间网格搜索估计得到目标信源的位置。为了验证算法性能，对算法进行理论分析，并对算法进行了仿真实验，与TDOA两步定位算法和传统的直接定位算法进行了对比。利用算法对实测数据进行处理，进一步验证了本文所提算法的性能。

1 信号模型

定位场景见图1，假设存在 M 个未知辐射源信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ ，其位置为 $p_1(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}), p_2(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}), \dots, p_M(x_{sM}, y_{sM}, z_{sM})$ 。存在 L 个无人机监测节点可以接收信号，各个节点坐标分别为 $B_1(x_1, y_1, z_1), B_2(x_2, y_2, z_2), \dots, B_L(x_L, y_L, z_L)$ ，无人机 l 接收到的信号记作 $y_l(t)$ ， $1 \leq l \leq L$ 。则 L 个基站的接收信号表达式为：

$$y_1(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_{1,m} s_m(t - \tau_{1,m}) + n_{1,m}(t), \quad y_2(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_{2,m} s_m(t - \tau_{2,m}) + n_{2,m}(t), \quad \dots, \quad y_L(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_{L,m} s_m(t - \tau_{L,m}) + n_{L,m}(t) \quad (1)$$

式中： $\alpha_{l,m}$ 和 $\tau_{l,m}$ 分别为第 m 个信号到第 l 个无人机的衰减系数和传播延迟 ($1 \leq l \leq L, 1 \leq m \leq M$)； $n_{l,m}(t)$ 为对应基站接收第 m 个信号的噪声分量。

式(1)中第 l 个无人机接收信号的采样表达式见式(2)：

$$y_l(k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{l,m} s_m(k) + n_{l,m}(k), \quad s_m(k) \triangleq s_m(t - \tau_{l,m})|_{t=kT}, \quad y_l(k) \triangleq y_l(t)|_{t=kT}, \quad n_{l,m}(k) \triangleq n_{l,m}(t)|_{t=kT}, \quad 0 \leq k \leq K-1 \quad (2)$$

式中： T 为采样间隔； K 为信号采样点数。可以得到各个无人机接收信号的离散表达式为：

$$y_1(k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{1,m} s_m(k) + n_1(k), \quad y_2(k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{2,m} s_m(k) + n_2(k), \quad \dots, \quad y_L(k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{L,m} s_m(k) + n_L(k), \quad 0 \leq k \leq K-1 \quad (3)$$

在得到各个无人机节点采集的信号后，对式(3)中的一系列接收信号进行傅里叶变换，可以得到

$$Y_1(w_k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{1,m} S_m(w_k) e^{-j\omega \tau_{1,m}} + N_1(w_k), \quad Y_2(w_k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{2,m} S_m(w_k) e^{-j\omega \tau_{2,m}} + N_2(w_k), \quad \dots, \quad Y_L(w_k) = \sum_{m=1}^M \alpha_{L,m} S_m(w_k) e^{-j\omega \tau_{L,m}} + N_L(w_k) \quad (4)$$

式中： $Y_l(w_k)$ 为第 l ($1 \leq l \leq L$) 个无人机节点接收所有信号的频域表达式； $\alpha_{l,m}$ 为第 m 个信源信号到第 l ($1 \leq l \leq L$)

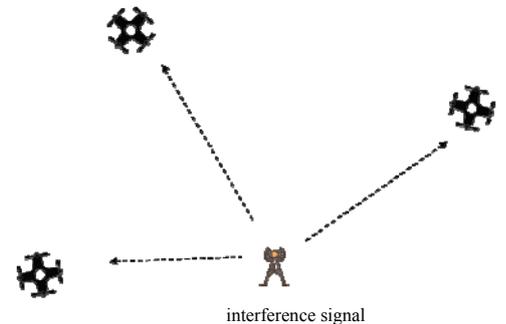


Fig.1 Positioning scene of multiple UAVs
图1 多无人机定位场景图

个无人机传输中的未知损耗因子； $S_m(w_k)$ 为信号 $s_m(k)$ 的离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)， $w_k \triangleq 2\pi k/KT$ ； $N_l(w_k)$ 为第 $l(1 \leq l \leq L)$ 个无人机节点接收信号对应噪声的傅里叶变换。

2 传统直接定位(DPD)算法

文献[7]基于多个固定阵列，对单个窄带信号进行定位，最早提出了一种直接定位方法。该方法除了考虑辐射源的 AOA 信息，还利用傅里叶变换，提取信号中的 TOA 信息，最终构建了基于 AOA 和 TDOA 的信号模型，随后基于最大似然(Maximum Likelihood, ML)准则，建立了仅与辐射源位置相关的代价函数，最终通过穷尽搜索法实现了辐射源位置的估计。同时，文献[20]将该最大似然算法应用于多个单天线场景中，并仿真实现。该直接定位方法的主要步骤如下：

1) 根据式(4)的频域信号表达式，建立与信源位置相关的代价函数，通过对代价函数最小化，得到辐射源位置的最小二乘估计结果。代价函数的表达式见式(5)：

$$Q(\mathbf{p}) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{K-1} \left\| Y_l(w_k) - [\alpha_{l,m} S_m(w_k) e^{-jw_k \tau_{l,m}}] \right\|^2 \quad (5)$$

式中： $\|\cdot\|$ 为范数符号； $\mathbf{p} = [p_1^T, p_2^T, \dots, p_M^T]$ 为待定位目标的位置矢量。

2) 对 $Q(\mathbf{p})$ 进行整理，表示为以下各项的和的形式：

$$Q(\mathbf{p}) = \sum_{l=1}^L Q_l(\mathbf{p}), \quad Q_l(\mathbf{p}) \triangleq \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left\| Y_l(w_k) - [\alpha_{l,m} S_m(w_k) e^{-jw_k \tau_{l,m}}] \right\|^2 \triangleq \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left\| Y_l(w_k) - [\alpha_{l,m} b_l(\mathbf{p})] \right\|^2 \quad (6)$$

式中 $b_l(\mathbf{p}) = S_m(w_k) e^{-jw_k \tau_{l,m}}$ 。为使得代价函数最小，对式(6)中的衰减系数 $\alpha_{l,m}$ 进行估计，结果见式(7)：

$$\hat{\alpha}_{l,m} = \left\{ [b_l(\mathbf{p})]^H b_l(\mathbf{p}) \right\}^{-1} [b_l(\mathbf{p})]^H Y_l(w_k) \quad (7)$$

不失一般性，假设如下：

$$\|b_l(\mathbf{p})\|^2 = 1 \quad \forall l \quad (8)$$

3) 将式(7)和式(8)代入式(6)中并化简，避免了求解式(6)，估计辐射源位置。最终通过求解包含辐射源位置信息的矩阵特征值的方式，确定辐射源位置。第一次从理论上证明了直接定位方法优于传统的两步定位方法。

3 本文直接定位方法

3.1 算法介绍

根据式(4)得到的频域信号表达式，将多个无人机节点的接收数据合成，可以得到合成后的表达式：

$$\mathbf{Y}(w) = \begin{bmatrix} Y_1(w) \\ Y_2(w) \\ \vdots \\ Y_L(w) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\omega \tau_{1,1}} \alpha_{1,1}, e^{-j\omega \tau_{1,2}} \alpha_{1,2}, \dots, e^{-j\omega \tau_{1,M}} \alpha_{1,M} \\ e^{-j\omega \tau_{2,1}} \alpha_{2,1}, e^{-j\omega \tau_{2,2}} \alpha_{2,2}, \dots, e^{-j\omega \tau_{2,M}} \alpha_{2,M} \\ \vdots \\ e^{-j\omega \tau_{L,1}} \alpha_{L,1}, e^{-j\omega \tau_{L,2}} \alpha_{L,2}, \dots, e^{-j\omega \tau_{L,M}} \alpha_{L,M} \end{bmatrix} \mathbf{S}(w) + \begin{bmatrix} N_1(w) \\ N_2(w) \\ \vdots \\ N_L(w) \end{bmatrix} = [\Phi(\alpha) \oplus \mathbf{A}(w, \mathbf{p})] \mathbf{S}(w) + \mathbf{N}(w) \quad (9)$$

式中： \oplus 为 Hadamard 乘积； $\Phi(\alpha)$ 为包含所有信号在所有基站衰减系数的矩阵，见式(10)； $\mathbf{S}(w)$ 为多个无人机节点接收的信号的傅里叶变换矩阵，见式(11)； $\mathbf{A}(w, \mathbf{p})$ 为包含位置信息的时延因子，见式(12)。因为接收信号时延和信源位置相关，所以时延信息可以定义为 $\tau_l(p_m) \triangleq \tau_{l,m}$ ，见式(13)。

$$\Phi(\alpha) = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{1,M} \\ \alpha_{2,1}, \alpha_{2,2}, \dots, \alpha_{2,M} \\ \vdots \\ \alpha_{L,1}, \alpha_{L,2}, \dots, \alpha_{L,M} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{S}(w) = \begin{bmatrix} S_1(w) \\ S_2(w) \\ \vdots \\ S_M(w) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A(w, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\tau_1(p_1)}, e^{-j\omega\tau_1(p_2)}, \dots, e^{-j\omega\tau_1(p_M)} \\ e^{-j\omega\tau_2(p_1)}, e^{-j\omega\tau_2(p_2)}, \dots, e^{-j\omega\tau_2(p_M)} \\ \vdots \\ e^{-j\omega\tau_L(p_1)}, e^{-j\omega\tau_L(p_2)}, \dots, e^{-j\omega\tau_L(p_M)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\tau_{l,m} = \frac{\sqrt{(x_{sm} - x_l)^2 + (y_{sm} - y_l)^2 + (z_{sm} - z_l)^2}}{c}, \quad \tau_l(p_m) \triangleq \tau_{l,m} \quad (13)$$

假设DFT之后共K个频点，建立直接和位置 \mathbf{p} 相关的目标函数，得到目标的估计位置 $\hat{\mathbf{p}}$ ：

$$\hat{\mathbf{p}} = \max_{\mathbf{p}} \sum_k |Y^H(w_k) [\Phi(\alpha) \oplus A(w_k, \mathbf{p})]| \quad (14)$$

式(14)利用相关方法求解辐射源位置，相关算法主要在于相位的补偿，而 $\Phi(\alpha)$ 为实数，且与频点 w_k 无关，因此可以将式(14)简化为 $\max_{\mathbf{p}} \sum_k |Y^H(w_k)(w_k, \mathbf{p})|$ ，最终利用式(15)得到干扰源位置：

$$\hat{\mathbf{p}} = \min_{\mathbf{p}} \sum_l \sum_k |Y^H(w_k) \{ I_{L \times L} - a_l(w_k, \mathbf{p}) [a_l(w_k, \mathbf{p})]^+ \} Y(w_k)| \quad (15)$$

式中： $I_{L \times L}$ 为 $L \times L$ 维的单位矩阵； $a_l(w_k, \mathbf{p})$ 为矩阵 $A(w_k, \mathbf{p})$ 的第 l 列； $(\cdot)^+$ 为求解矩阵的广义逆矩阵； $(\cdot)^H$ 为矩阵的共轭转置。式(15)的构造利用的是 $A(w_k, \mathbf{p})$ 与 $Y(w_k)$ 的正交投影矩阵之间的正交性，基于该目标函数，可以对多个未知辐射源，包括同频信号源进行位置估计。

基于包含位置信息的信号时延因子 $A(w, \mathbf{p})$ ，本文提出了一种直接定位方法，即利用信号中的相位信息进行定位。但这些相位信息可能存在模糊问题，使多个不同位置点，对应同一个相位，这对于信号源的定位精确度有一定影响。

本文提出的算法基于分布式多无人机平台，根据每个无人机得到的相位信息，可能得到多个虚假位置点，但是不同无人机对应的可能位置点，除了真实信源点一样，其他虚假位置点都不重合，这有效地降低了相位模糊对于定位的影响。同时，通过无人机多次移动，将多次移动的监测数据聚类分析，可以进一步降低相位模糊对于定位的影响。

本文算法的关键步骤如下：

- 1) 提取 $L(L \geq 4)$ 个频谱监测基站接收的来自未知辐射源的辐射信号 y ；
- 2) 对提取的辐射源信号进行 DFT 变换，得到信号频域表达式 Y ；
- 3) 将多个监测站的频域数据进行合成，多频点累加，建立与干扰源位置直接相关的代价函数；
- 4) 对监测区域网格化，基于所提出的直接定位方法得到目标信源的位置；
- 5) 多无人机移动监测，并不断缩小监测区域，对多次定位结果聚类分析，得到最终定位结果。

3.2 复杂度分析

为更好地分析本文所提算法的性能，在该分布式定位场景下，对各个算法进行复杂度分析。对于本文提出的直接定位算法，其复杂度为 $O(L^4 K^2 T^2 + LKM)$ ，其中 T 为算法在二维平面 x 和 y 方向上的搜索网格数。文献[5]中基于时延补偿的 TDOA 定位算法，其复杂度为 $O\left\{M \left[L(2J+K) + 3(L-1)K \log_2^k + (L-1)K^2 + 7(L-1)^2 \right] \right\}$ ，其中 J 为互相关的次数。文献[7]中的 LS_DPD 复杂度为 $O(2KT^2 + T^2L^2 + KLM)$ 。经过分析可以知道，两种直接定位算法复杂度接近，且在大范围搜索的情况下，复杂度明显高于改进的 TDOA 算法。

4 算法验证

4.1 仿真实验

为验证所提算法的可行性，进行仿真实验：4 架无人机分别在 3 个位置进行数据接收，主要参数设置见表 1，仿真的散点见图 2。从图 2 中可以看出，存在 4 个监测节点时，利用本算法，能准确定位出信号源的位置，误差很小。

表 1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

| parameter | true source coordinates/m | base station coordinates/m | distance between base station and source/m |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| monitoring location 1 | $u=[35,170,85]^T$ | $L_1=[810,1360,870]^T$, $L_2=[2360,870,750]^T$, $L_3=[1800,2550,1670]^T$, $L_4=[2750,3020,2130]^T$ | $d_1=1622.6, d_2=2517.5$ $d_3=3370.9, d_4=4435.7$ |
| monitoring location 2 | $u=[35,170,85]^T$ | $L_1=[764,936,807]^T$, $L_2=[1306,847,795]^T$, $L_3=[1762,2505,1367]^T$, $L_4=[2750,3202,2153]^T$ | $d_1=1280.4, d_2=1605.6$ $d_3=3174.6, d_4=4407.5$ |
| monitoring location 3 | $u=[35,170,85]^T$ | $L_1=[564,936,807]^T$, $L_2=[1706,947,895]^T$, $L_3=[1362,1505,1367]^T$, $L_4=[1705,1202,2153]^T$ | $d_1=1119.6, d_2=2013.0$ $d_3=2277.4, d_4=2851.4$ |

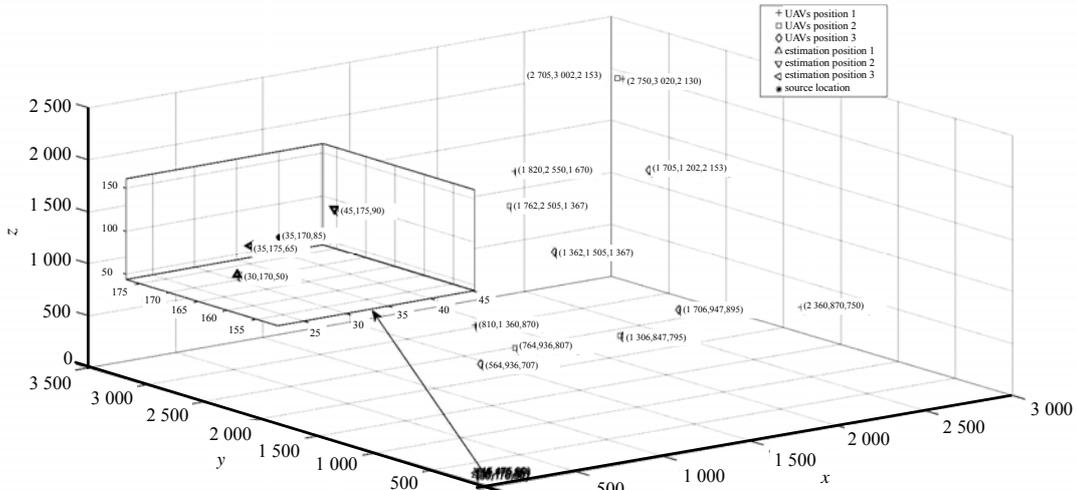


Fig.2 Locating result with $R_{SN}=5$ dB
图 2 定位散点图($R_{SN}=5$ dB)

采用蒙特卡洛仿真来验证方案性能,并使用均方误差来评价该方案定位性能,均方误差定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{C} \sum_{c=1}^C (\|\hat{u}_c - u\|)^2} \quad (16)$$

式中: C 为蒙特卡洛仿真次数; u 为信号源的真实位置; \hat{u}_c 是第 c 次蒙特卡洛仿真时的空间位置估计值。

利用无人机平台可以移动监测的优势,假设无人机移动了多次并进行了数据监测。无人机第 1 次监测位置坐标为 $L_1=[810,1360,870]^T, L_2=[2360,870,750]^T, L_3=[1800,2550,1670]^T, L_4=[2750,3020,2130]^T$ 。性能对比的结果见表 2。无人机监测平台移动至第 2 个监测点,各无人机平台坐标为: $L_1=[764,936,807]^T, L_2=[1306,847,795]^T, L_3=[1762,2505,1367]^T, L_4=[2750,3202,2153]^T$,对两次监测点的数据平均处理,定位估计性能较一个监测点的性能有所提升,性能对比的结果见表 3。无人机监测平台移动至第 3 个监测点,各个无人机平台的坐标为: $L_1=[564,936,807]^T, L_2=[1706,947,895]^T, L_3=[1362,1505,1367]^T, L_4=[1705,1202,2153]^T$,综合考虑在这 3 个地点的定位结果,性能对比的结果见表 4。从以上结果分析可知,单次监测时 3 km 范围内平均定位误差在 10~20 m,而随着无人机平台的移动,监测地点发生改变,多个监测地点的数据进行融合,则定位误差可进一步降低,在 10 m 左右。

为进一步验证所提算法的定位性能,将本文算法与 TDOA 两步定位算法^[5]、传统最小二乘 DPD 算法^[7]进行对比。在 100 次蒙特卡洛仿真实验后,仿真的 RMSE 结果见图 3。信噪比范围为 -10~15 dB,间隔为 5 dB,信号带宽为 $B_{\text{signal}}=3 \times 10^5$ Hz。3 个接收基站的坐标分别为 (1000,2000),(5000,2000) 和 (1000,0),信源真实坐标为(1000,2000)。可以看出,几种算法随着信噪比的增加,定位性能逐渐提高。本文所提直接定位算法和传统的 DPD 算法性能明显优于改进的 TDOA 两步定位算法。同时,本文所提直接定位算法性能相对于传统的 DPD 算法也有所改善。

表 2 一次监测的 RMSE

| average SNR | $R_{SN}=-1.44$ dB | $R_{SN}=2.56$ dB | $R_{SN}=6.56$ dB | $R_{SN}=10.56$ dB |
|---------------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| average positioning error | 18.623 0 | 18.141 3 | 18.319 0 | 15.934 1 |

表 3 二次监测的 RMSE

| average SNR | $R_{SN}=-3.7197$ dB | $R_{SN}=0.28$ dB | $R_{SN}=4.28$ dB | $R_{SN}=8.28$ dB |
|---------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| average positioning error | 14.842 5 | 10.744 8 | 12.267 6 | 11.488 9 |

表 4 三次监测的 RMSE

| average SNR | $R_{SN}=-5.67$ dB | $R_{SN}=-1.67$ dB | $R_{SN}=3.67$ dB | $R_{SN}=7.67$ dB |
|---------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| average positioning error | 10.645 0 | 10.331 9 | 7.666 1 | 7.009 9 |

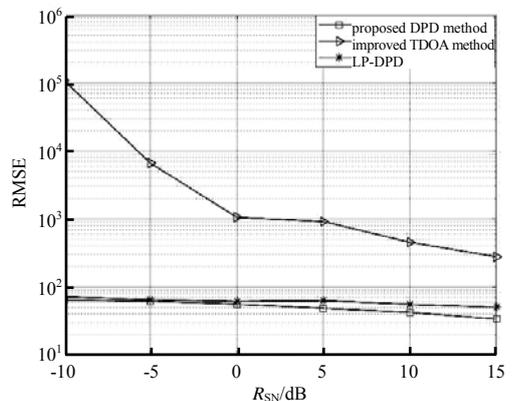


Fig.3 Performance comparison versus SNR
图 3 定位性能对比图

4.2 实测数据处理

为进一步验证本方法定位的有效性，采用已有的设备：校园中的监测节点，见图 4，进行模拟实验，采集测量数据。利用本文算法对实测数据进行处理，估计出信源的位置，进而验证本方法的有效性。图 4 中标注了各个节点的位置以及模拟信源的位置。

实验中，信号源发射了多种不同调制方式的信号，包括单频率信号、具有一定带宽的信号。每种调制信号，信号源都发射了 3 种不同功率，分别为：5 dBm,10 dBm,15 dBm。建立一个三维的相对坐标系，各个节点以及信源在相对坐标系中的坐标见图 4。利用本文算法对发射功率为 15 dBm 的单频信号进行处理，信源的估计结果见图 5。可以看出，估计信源的位置接近信源真实的位置。



Fig.4 Schematic of a distributed positioning system
图 4 分布式定位系统示意图

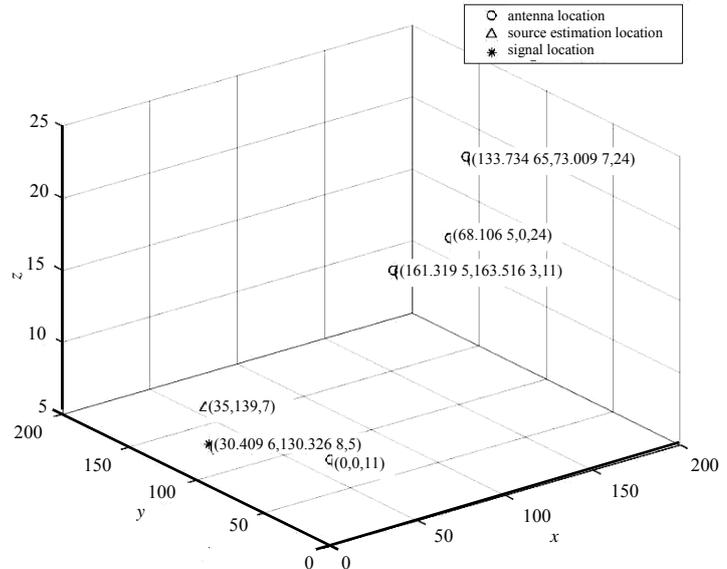


Fig.5 Coordinate chart of the positioning result
图 5 定位结果坐标图

对码元速率为 40 bit/s，载波频率为 700 MHz 的宽带信号进行处理。采用本文算法和文献[5]中的改进 TDOA 算法对宽带信号进行处理。从图 5 可以知道，信号源的真实相对坐标为 (30.409 6,130.326 8,5)，2 种算法对 3 种不同发射功率的信号处理后，分别估计得到的信源位置信息，具体结果见表 5。针对表 5 得到的 2 种算法估计结果，分别计算 2 种算法的估计结果与信源真实坐标之间的误差，结果见图 6，可以看出本文所提的直接定位算法，定位误差明显小于改进的 TDOA 算法。

5 结论

传统的两步定位算法存在信息损失、误差累积等问题，且地面监测平台易受干扰，影响信号接收质量。针对这些问题，本文提出了一种基于分布式多无人机监测的频域直接定位算法。该方法采用多无人机平台监测，避免了地面平台易受干扰的问题，降低了多径效应，提高了接收信号的有效性。相对于传统的直接定位方法，该方法采用多频点累加的方式处理数据，既能处理窄带信号也能处理宽带信号。仿真实验验证了多无人机平台移动性对于定位性能的提升，同时将本方法与传统的直接定位算法以及改进的 TDOA 算法进行对比，证明了本文算法对于未知辐射源定位的有效性。最后，利用本文算法对实测数据进行处理，估计信源位置接近真实的信源位置，进一步证明了本文算法的有效性。

表 5 各个算法的定位结果

Table5 Positioning result of each algorithm

| | TDOA | proposed DPD |
|--------|-------------------------------|--------------|
| 5 dBm | (26.267 9,91.741 2,-95.925 2) | (34,118,8) |
| 10 dBm | (38.622,89.5748,-49.5776) | (29,127,2) |
| 15 dBm | (42.4915,88.7874,-2.5021) | (33,125,5) |

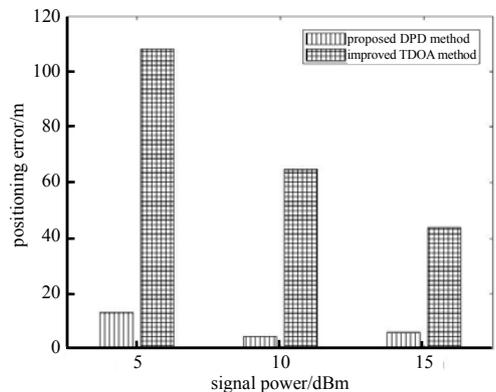


Fig.6 Positioning error of each algorithm
图 6 各个算法的定位误差

参考文献:

- [1] 王大鸣,任衍青,逯志宇,等. 分布式信源数据域直接位置估计方法[J]. 电子与信息学报, 2018,40(2):371-377. (WANG Daming,REN Yanqing,LU Zhiyu,et al. Direct Position Determination of the distributed source[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018,40(2):371-377.)
- [2] YIN Jiexin,WU Ying,WANG Ding. Direct position determination of multiple noncircular sources with a moving array[J]. Circuits,Systems and Signal Processing, 2017,36(10):4050-4076.
- [3] TIRER T,WEISS A J. Performance analysis of high resolution direct position determination method[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017,65(3):544-554.
- [4] 冯奇,曲长文,周强. 多运动站异步观测条件下的直接定位算法[J]. 电子与信息学报, 2017,39(2):417-422. (FENG Qi,QU Changwen,ZHOU Qiang. Direct Position Determination using asynchronous observations of multiple moving sensors[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2017,39(2):417-422.)
- [5] HE Y,LI J,ZHANG X. Adaptive cascaded high-resolution source localization based on collaboration of multi-UAVs[J]. China Communications, 2020,17(4):165-179.
- [6] 王大鸣,任衍青,逯志宇,等. 融合多普勒频移信息的阵列数据域直接定位方法[J]. 电子与信息学报, 2018,40(5):1219-1225. (WANG Daming,REN Yanqing,LU Zhiyu,et al. Array-based Direct Position Determination method fusing Doppler frequency shift information[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018,40(5):1219-1225.)
- [7] WEISS A. Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004,11(5):513-516.
- [8] BOSSE J,FERREOL A,LARZABAL P. Performance analysis of passive localization strategies:direct one step approach versus 2 steps approach[C]// 2011 IEEE Statistical Signal Processing Workshop(SSP). Nice,France:IEEE, 2011:701-704.
- [9] LU Z Y,BIN B A,WANG J,et al. A direct position determination method with combined TDOA and FDOA based on particle filter[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018,31(1):161-168.
- [10] ZHOU L,ZHU W,LUO J,et al. Direct positioning maximum likelihood estimator using TDOA and FDOA for coherent short-pulse radar[J]. IET Radar,Sonar & Navigation, 2017,11(10):1505-1511.
- [11] 王云龙,吴瑛. 联合时延与多普勒频率的直接定位改进算法[J]. 西安交通大学学报, 2015,49(4):123-129. (WANG Yunlong,WU Ying. An improved Direct Position Determination algorithm with combined time delay and Doppler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015,49(4):123-129.)
- [12] TZORE E,WEISS A J. Expectation-maximization algorithm for direct position determination[J]. Signal Processing, 2017 (133):32-39.
- [13] WANG G,GAO C,RAZUL S G,et al. A new Direct Position Determination algorithm using multiple arrays[C]// 2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing(DSP). Shanghai,China:IEEE, 2018:1-5.
- [14] YIN Jiexin,WANG Ding,WU Ying,et al. Direct localization of multiple stationary narrowband sources based on angle and Doppler[J]. IEEE Communications Letters, 2017,21(12):2630-2633.
- [15] 黄志英,吴江,甘戈. 通道幅相差下的多阵列直接定位算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):745-749. (HUANG Zhiying,WU Jiang,GAN Ge. Multi-array direct position determination algorithm with gain-phase error[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):745-749.)
- [16] 黄清顺,邓兵. 基于 TDOA 和 SDOA 的宽带辐射源双机无源定位算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, doi:10.11805/TKYDA2020419. (HUANG Qingshun,DENG Bing. A passive location algorithm based on TDOA and SDOA for wideband radiation sources[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, doi:10.11805/TKYDA2020419.)
- [17] WEISS A J. Direct geolocation of wideband emitters based on delay and Doppler[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011,59(6):2513-2521.
- [18] VANKAYALAPATI N,KAY S,DING Q. TDOA based direct positioning maximum likelihood estimator and the Cramer-Rao bound[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014,50(3):1616-1635.
- [19] POKRAJAC I P,VUCIC D,OKILJEVIC P. Direct position determination of wideband signals:coherent and noncoherent approach[C]// 2013 11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite,Cable and Broadcasting Services(TELSIKS). Washington,USA:IEEE, 2013:77-80.
- [20] CHEN F,ZHOU T,YI W,et al. Passive direct position determination of multiple emitters transmitting unknown LFM signals[C]// 2018 IEEE Radar Conference(RadarConf18). Oklahoma City,OK,USA:IEEE, 2018:1129-1133.