

基于外辐射源的空中目标直接定位算法

夏楠, 高丹阳, 邢宝辉, 王亚宁

(大连工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 大连 116034)

摘要: 为了提高空中目标定位的准确性并保证其隐蔽性, 提出一种基于外辐射源的空中目标直接定位算法。利用固定广播信号作为发射源, 对经过空中目标散射的信号进行多站接收, 建立同步采集的多维基带信号和目标位置坐标的直接联系, 并构造空间互谱函数和联合匹配函数。通过迭代式谱峰搜索, 获得对空中目标的优化定位, 并能够有效抑制地面直达波和多径信号的干扰。仿真结果表明, 所提算法在低信噪比情况下性能优于传统两步定位法和其他直接定位方法, 能够实现三维空中目标的高精度定位。

关键词: 外辐射源; 直接定位; 空间互谱函数; 联合匹配函数; 多径干扰抑制

中图分类号: TN911.72

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023120

Direct localization algorithm of the aerial target based on external radiation source

XIA Nan, GAO Danyang, XING Baohui, WANG Yaning

School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China

Abstract: In order to improve the accuracy of aerial target location and ensure its concealment, a direct location algorithm of the aerial target based on external radiation source was proposed. Fixed broadcast signals were used as transmitting sources, and the signals scattered by the aerial targets were received by multiple receivers. A direct relationship between the synchronized multi-dimensional baseband signals and the position coordinates of the target was established, and then the spatial cross-spectrum function and joint matching function were constructed. Through iterative spectral peak search, the positioning results of the aerial target could be optimized, and the impact of direct signals and multipath signals on the ground could be effectively suppressed. Simulation results show that the performance of the proposed algorithm is better than that of the traditional two-step localization method and other direct localization methods in the case of low signal-to-noise ratio (SNR), and it can achieve high-precision localization of the three-dimensional mobile target.

Keywords: external radiation source, direct location, spatial cross-spectrum function, joint matching function, multipath interference suppression

0 引言

外辐射源雷达是一种新体制雷达, 通过反射第三方辐射源向目标发送信号进行定位。传统主动式有源雷达^[1]自身发射大功率电磁波, 容易受到对方的电子干扰与侦察, 甚至还会成为反辐射导弹攻击的目标^[2], 使雷达的生存面临极大的挑战和威胁。

为了提高雷达的生存能力并充分发挥其作用, 新体制雷达系统应运而生。作为无源雷达^[3]的外辐射源雷达可从根本上消除电子干扰的影响, 具有更强的隐蔽性, 是一种极具潜力的新型被动定位系统。根据参数测量的不同, 可采用时差定位^[4-6]、基于波达方向定位^[7]、到达时间定位^[8]、到达频差定位^[9]等算法以及其他混合算法^[10-12]进行定位。

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-06-20

基金项目: 教育部产学合作教育基金资助项目 (No.220603231024713)

Foundation Item: Industry-University Cooperation Education Project of the Ministry of Education (No.220603231024713)

无源被动定位系统按照其定位流程结构可分为两类。第一类是间接定位法。文献[13]提出了基于插值的时差参数高精度测量方法,文献[14]提出了基于两阶段加权最小二乘的时差定位方法,2种方法均需要利用提前测量的参数建立定位方程,解算出目标位置,所以间接法也被称为两步定位法,计算复杂度较低,易于实现。对于两步法的时差测量,文献[15]和文献[16]分别对匹配滤波法和互相关法进行介绍,但在较强的噪声环境下,定位中会存在不受互相关法约束的超过分辨极限的问题。为了解决这个问题,文献[17]介绍了一种基于相关熵的期望最大化得到高分辨率的方法。文献[18]提出利用外辐射源进行目标监测,采用多个发送站多个接收站的模式,利用拉格朗日子式求解约束加权最小二乘的方法进行定位,目标隐蔽性得到明显改善。但不能忽略的是在两步法中,中间参数测量与目标位置解算过程独立进行,多个中间参数测量值之间缺少定位目标与观测站间的空间几何约束关系^[19],在低信噪比以及短数据情况下,这些时差估计方法性能会严重下降。

第二类是直接定位^[20]法,该方法显著克服了间接定位法的弊端。直接定位法不需要测量参数,目标信息参数直接包含在接收信号中,能够直接得到目标定位结果,显著提高定位精度。其中,利用外辐射源的目标定位法易于组网,定位精度高,应用广泛。因此关于外辐射源的直接定位法^[21-23]逐渐得到了重视。文献[24]利用多输入多输出(MIMO, multiple input and multiple output)雷达提出了仅针对静止目标的有效极大似然的直接定位算法,但其受限于目标状态。文献[25]考虑了目标状态,将直接定位思想和最小方差无失真响应^[26]结合起来并提出了一种高分辨率的定位方法,但该方法是基于多维网格搜索实现的,计算量庞大。文献[27]提出了一种基于多阵列数据融合的直接定位算法,利用粒子群优化算法在监测区域内寻找对噪声子空间投影的最佳阵列响应来确定目标的位置,计算问题虽然得到解决,但没有考虑直达波以及多径的存在。文献[28]采用直接定位算法直接对目标进行空间内的超矩形划分,通过遗传算法对目标值进行计算,对直达路径进行了抑制,但地面多径问题仍然存在。

空中目标散射信号较弱,传统两步定位法在低信噪比下无法实现高精度定位,同时地面多径的影响加剧了对目标定位的难度。针对已有研究方法存在的问题,本文提出了一种基于空间互谱函数的目

标直接定位算法。该算法可以直接从构造的互谱函数中得出目标位置,实现了时域到空间域的转变。由于不同路径的信号相位不同,在构造匹配函数的过程中,不同路径信号在求和时被消除,只留下与目标位置有关的部分,因此有效抑制地面直达路径和多径影响,实现了高精度定位。该算法改善了间接定位法中同一个目标位置存在约束的条件,具有低信噪比下定位效果好、应用范围扩展到空中目标、抑制多径干扰的优点。本文创新点总结如下。

1) 建立了多站同步采集数据与三维空中目标位置之间的直接定位系统模型。

2) 提出了一种联合匹配函数,由于地面波来自不同的发射源,散射信号来自同一空中目标,通过随机生成特定区域范围位置样本和极大值搜索,有效抑制多径干扰,实现了目标位置的高精度估计。

3) 提出了位置估计迭代优化算法,通过对位置样本在动态范围内不断更新及匹配,实现对空中目标的跟踪定位。

1 信号模型

本文将固定广播发送站作为外辐射源,利用分布式多站同步采集的基带信号,对目标位置直接进行估计。本文提出的基于外辐射源的空中目标定位系统模型如图1所示。

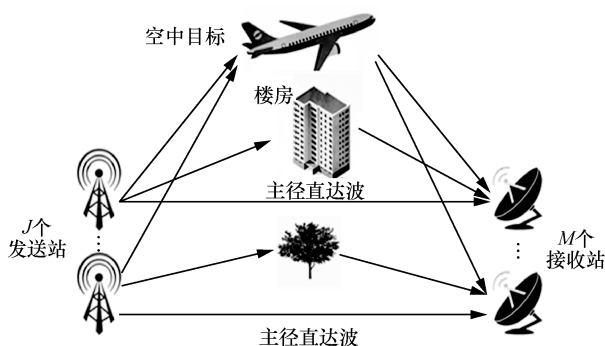


图1 基于外辐射源的空中目标定位系统模型

假设空中目标在三维直角坐标系下进行匀速直线运动。地面有 $j(j=1,2,\dots,J)$ 个外辐射源和 $m(m=1,2,\dots,M)$ 个接收站,能够采集到由监测区域内空中目标散射的信号。同时,接收站能够收到来自外辐射源的主径直达波和多径信号,其中 $l=1,2,\dots,L$ 表示多径的数量。假设各接收站对信号进行时间同步接收,则在第 n 个采样周期内第 j 个发送站到达第 m 个接收站的接收信号可以表示为

$$r_{j,m}^n(t) = a_{j,m} s_j(t - \sigma_{j,m}) + a'_{j,m} s_j(t - \tau_{j,m}^n) + \sum_{l=1}^L a''_{j,m,l} s_j(t - \varepsilon_{j,m,l}) + u_{j,m}^n(t) \quad (1)$$

相关参数说明如下。

1) $a_{j,m}$ 是第 j 个外辐射源信号 $s_j(t)$ 到第 m 个接收站直达路径的信道衰减系数, t 是每个采样周期内的时间序号, $\sigma_{j,m}$ 是直达路径之间的时延, 表示为

$$\sigma_{j,m} = \frac{1}{c} (\|\alpha_j - \beta_m\| - \|\alpha_j - \beta_1\|) \quad (2)$$

其中, c 为光速, $\alpha_j \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 是第 j 个外辐射源的坐标向量, $\beta_m \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 是第 m 个接收站的坐标向量, 且两者高度均在地面附近, 选取 $m=1$ 为参考路径, 则有 $\sigma_{j,1} = 0$ 。

2) $a'_{j,m}$ 是第 j 个外辐射源信号到第 m 个接收站经空中目标散射路径的信道衰减系数, $\tau_{j,m}^n$ 是经目标散射路径的相对时延, 表示为

$$\tau_{j,m}^n = \frac{1}{c} (\|\alpha_j - \mathbf{x}^n\| + \|\beta_m - \mathbf{x}^n\| - \|\beta_1 - \alpha_j\|) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{x}^n \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 是空中移动目标在第 n 个采样周期内的坐标向量。

3) $a''_{j,m,l}$ 是第 j 个外辐射源信号到第 m 个接收站经地面障碍物反射路径的信道衰减系数, $\mathbf{x}_l \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 是第 l 条地面多径上障碍物的坐标向量, 且障碍物位在地面主径周边, $\varepsilon_{j,m,l}$ 是经地面障碍物反射的时延, 可表示为

$$\varepsilon_{j,m,l} = \frac{1}{c} (\|\alpha_j - \mathbf{x}_l\| + \|\beta_m - \mathbf{x}_l\| - \|\beta_1 - \alpha_j\|) \quad (4)$$

在现实环境下, 信号会受到地面障碍物 (如楼房或者山峰) 等诸多障碍物干扰, 产生反射或折射, 所以在目标估计过程中也要考虑多径传播的存在。

4) $u_{j,m}^n(t)$ 表示零均值复高斯白噪声。

2 空间互谱定位算法

2.1 算法原理

根据系统模型可知, 本文的定位系统中包含信号强度较弱的目标散射信号, 且有地面直达路径和多径的干扰, 如果使用传统的两步定位法会造成对时延和多普勒的估计不准确。因此, 本文提出了一种将时域信号转换到空间域且能够有效抑制地面直达路径和多径影响、实现高精度定位的空间互谱定位算法。

对离散采样后的接收信号进行傅里叶变换, 可以将时域信号的传输时延从信号波形中分离出来, 即

$$R_{j,m}^n(k) = S_j(k) \left(a_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \sigma_{j,m}} + a'_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \tau_{j,m}^n} + \sum_{l=1}^L a''_{j,m,l} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,m,l}} \right) + U_{j,m}^n(k) \quad (5)$$

其中, $S_j(k)$ 是 $s_j(t)$ 的傅里叶变换, $k=1,2,\dots,K$ 是频域索引, $U_{j,m}^n(k)$ 是 $u_{j,m}^n(t)$ 的傅里叶变换。构造接收信号互谱函数为

$$\begin{aligned} R_{j,m}^n(k)(R_{j,1}^n(k))^H = & |S_j(k)|^2 \left[a_{j,1}^H a_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \sigma_{j,m}} + \right. \\ & a_{j,1}^H a'_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \tau_{j,m}^n} + a_{j,1}^H \sum_{l=1}^L a''_{j,m,l} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,m,l}} + \\ & (a'_{j,1})^H a_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} (\sigma_{j,m} - \tau_{j,1}^n)} + \\ & (a'_{j,1})^H a'_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} (\tau_{j,m}^n - \tau_{j,1}^n)} + \\ & (a'_{j,1})^H e^{i2\pi \frac{k}{K} \tau_{j,1}^n} \sum_{l=1}^L a''_{j,m,l} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,m,l}} + \\ & a_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \sigma_{j,m}} \sum_{l=1}^L (a''_{j,1,l})^H e^{i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,1,l}} + \\ & a'_{j,m} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \tau_{j,m}^n} \sum_{l=1}^L (a''_{j,1,l})^H e^{i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,1,l}} + \\ & \left. \sum_{l=1}^L a''_{j,m,l} e^{-i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,m,l}} \sum_{l=1}^L (a''_{j,1,l})^H e^{i2\pi \frac{k}{K} \varepsilon_{j,1,l}} \right] + U_{j,m}^n(k) \quad (6) \end{aligned}$$

其中, $\sigma_{j,m}$ 已知, $U_{j,m}^n(k)$ 表示经过乘积运算后叠加的噪声项, H 表示对复变量取共轭。通过分析可知, 等号右边中括号中的第 1 项是与目标位置无关的直达路径; 第 3、7、9 项是与目标位置无关的地面多径; 第 4 项和第 6 项只包含一条路径的散射信号时延信息, 没有多路径时延信息 $\tau_{j,m}^n$, 无法通过多径信号匹配来确定目标位置; 第 5 项是散射信号幅度的乘积形式, 系数较小可以忽略; 第 8 项由于包含了地面多径的时延信息, 会对提取目标位置造成干扰, 无法通过后续匹配完成定位; 只有第 2 项包含目标的位置信息, 采用对空中监测区域搜索的办法, 抑制杂波影响, 构造时延样本为

$$\tau_p^n = \frac{1}{c} (\|\alpha_j - \mathbf{x}_p^n\| + \|\beta_m - \mathbf{x}_p^n\| - \|\beta_1 - \alpha_j\|) \quad (7)$$

其中, $p=1,2,\dots,P$ 表示坐标的位置样本数, $n=1,2,\dots,N$ 表示采样周期, $\mathbf{x}_p^n \in \mathbb{R}^3$ 表示在第 n 个采样周期中目标三维坐标的随机样本, 由此可以进一步构造匹配因子 $e^{i2\pi \frac{k}{K} \tau_p^n}$ 、第 j 个接收站和外辐射

源信号之间的匹配函数为

$$F_{j,m}^n(p) = \frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K R_{j,m}^n(k) (R_{j,1}^n(k))^H e^{i2\pi \frac{k}{K} \tau_p^n} \quad (8)$$

由于多个外辐射源位置不同，而空中目标位置是唯一的，为避免把辐射源误识别为目标，本文算法对各站接收信号进行累乘处理，进而得到联合匹配函数，表示为

$$F(p) = \prod_{j=1}^J \prod_{m=1}^M F_{j,m}^n(p) \quad (9)$$

$F(p)$ 的第 n 次目标位置估计值为

$$\hat{\mathbf{x}}^n = \arg \max_{\mathbf{x}_p^n} |F(p)| \quad (10)$$

其中， $\hat{\mathbf{x}}^n \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ，目标搜索过程中，位置样本离目标实际位置越接近，谱的幅度越大，因此在坐标 \mathbf{x}_p^n 处 $|F(p)|$ 有最大值，从而获得位置的估计值。

为了得到优化的参数估计结果，进一步提升定位精度，需要对每次定位结果进行迭代样本更新，具体过程如下。

1) 当 $n=1$ 时，对样本进行初始化，有 $\mathbf{x}_p^1 \sim U(E)$ ，其中， $U(\cdot)$ 表示均匀分布函数， E 表示给定的三维区域范围。

2) 当 $n=2$ 时，在上一次目标估计位置附近叠加一个较大幅度的扰动，表示为

$$\mathbf{x}_p^2 = \hat{\mathbf{x}}^1 + A_1 \mathbf{u} \quad (11)$$

其中， A_1 表示第二次迭代的扰动系数， \mathbf{u} 表示扰动向量，服从均值为 0、方差为 1 的高斯分布。

3) 当 $n \geq 3$ 时，利用前两次定位结果，可推算出目标飞行速度，再叠加较小的随机扰动增加位置样本的多样性，则第 n 次迭代目标位置可以表示为

$$\mathbf{x}_p^n = \hat{\mathbf{x}}^{n-1} + (\hat{\mathbf{x}}^{n-1} - \hat{\mathbf{x}}^{n-2}) + A_2 \mathbf{u} \quad (12)$$

其中， A_2 表示叠加的扰动系数，且 $A_2 \ll A_1$ 。

根据上文所介绍的空间互谱定位算法原理，具体给出该算法的计算过程，如算法 1 所示。

算法 1 空间互谱定位算法

- 1) 初始化：在三维空间产生位置样本，服从均匀分布 $\{\mathbf{x}_p^1\}_{p=1}^P \sim U(E)$ ；
- 2) for $n=1,2,\dots,N$
- 3) 对同步接收的时域信号进行 FFT，得到 $R_{j,m}^n(k)$ ；
- 4) 根据式(6)构造互谱函数；
- 5) 由 \mathbf{x}_p^n 构造时延样本 τ_p^n 和匹配因子 $e^{i2\pi \frac{k}{K} \tau_p^n}$ ；

- 6) 根据式(8)得到匹配函数 $F_{j,m}^n(p)$ ；
- 7) 根据式(9)得到联合匹配函数 $F(p)$ ；
- 8) 根据式(10)搜索峰值，得到位置估计值 $\hat{\mathbf{x}}^n$ ；
- 9) 根据式(11)和式(12)更新位置样本。
- 10) end for

2.2 计算复杂度

本节结合算法 1 给出空间互谱定位算法计算复杂度分析，此复杂度的计算过程仅包含复数乘法，具体情况如下。

用 c_1 、 c_2 和 c_3 分别表示 n 时刻产生的均匀分布随机数、高斯分布随机数和搜索最大值的计算量。算法 1 中的步骤 1) 产生三维位置样本点计算量为 $3c_1P$ 。步骤 3) 对 J 个发送站、 M 个接收站所产生的 JM 组数据进行快速傅里叶变换，数据长度为 K ，计算量为 $\frac{KJM}{2} \text{lb}K$ 。步骤 4) 构造互谱函数是两组数据对应元素相乘，其计算量为 KJM 。步骤 5) 构造时延样本与匹配因子，不包括复数乘法，可忽略不计。步骤 6) 为互谱函数与匹配因子相乘计算匹配函数，其计算量为 $KJMP$ 。步骤 7) 联合匹配函数计算量为 $(JM-1)P$ 。步骤 8) 搜索最大值的计算量为 c_3 。步骤 9) 更新位置样本计算量为 $3c_2P$ 。因此，本文提出的空间互谱定位算法的计算复杂度可表示为

$$C = KJM \left(P + \frac{1}{2} \text{lb}K + 1 \right) + P(JM + 3c_1 + 3c_2 - 1) + c_3 \quad (13)$$

3 实验仿真与分析

为验证本文算法的性能，进行计算机仿真验证，计算机配置处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-10875H CPU @ 2.30 GHz，显卡为 NVIDIA GeForce RTX2060 6 GB。仿真条件设置如下。

假设监测定位场景三维空间 E 的范围是 $(-3,3) \text{ km} \times (-3,3) \text{ km} \times (0,10) \text{ km}$ ，外辐射源和接收站位置在此随机产生。外辐射源为频率调制信号，信号带宽为 100 kHz，接收站具备时间同步功能，基带信号采样率为 4 MHz。各类信号幅度采用相应分布区间内随机方式产生并进行归一化，直达路径信号幅度范围是 $(0.8,1.0)$ ，地面多径信号幅度范围是 $(0.5,0.8)$ ，经空中目标散射的信号幅度范围是 $(0.1,0.2)$ 。每路接收信号中包含 1 路地面直达信号、2~5 路多径信号和 1 路空中散射信号。移动目标也

位于 E 的三维区域内，且进行匀速直线运动，起始位置为 $\mathbf{x}^1 = [2.5, 1, 8]^T$ ，在该区域内飞行时间为 30 s，飞行轨迹可以表示为

$$\begin{cases} x = 2.5 - 0.23n \\ y = 1 - 0.1n \\ z = 8 \end{cases} \quad (14)$$

设置式(11)中 $A_1 = 100$ ，式(12)中 $A_2 = 20$ 。

为对比各算法对目标位置的估计精度，将均方根误差 (RMSE, root mean square error) 定义为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \|\hat{\mathbf{x}}_q - \mathbf{x}\|^2} \quad (15)$$

其中， Q 为蒙特卡罗实验次数，本文取 $Q=500$ ， $\hat{\mathbf{x}}_q$ 为第 q 次蒙特卡罗实验的目标位置估计，为目标位置。同时给出信噪比 SNR 定义为

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (16)$$

其中， P_s 表示式(1)中无噪声信号总功率， P_n 表示噪声功率，信噪比的单位是 dB。

为了验证算法的影响因素准确性，本文进行了以下实验，分别为外辐射源数量、接收站数量、位置样本数、采样点数、目标运动轨迹和不同信噪比下算法对 RMSE 的影响。

实验 1。设置接收站数量为 $M = 5$ ，采样点数 $K = 8000$ ，信号的信噪比 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ ，位置样本数 $P = 3000$ ，改变外辐射源数量 J ，进行关于 RMSE 随时间变化的实验，仿真结果如图 2 所示。

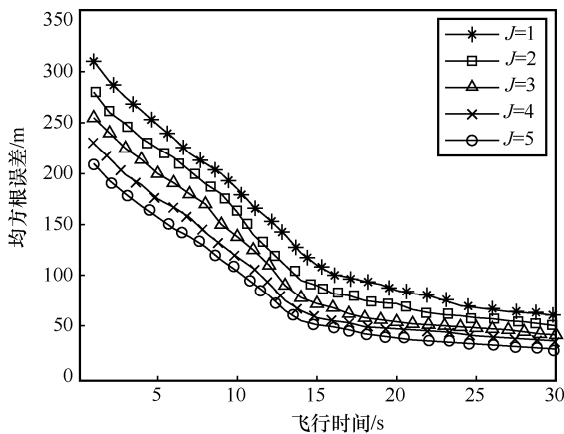


图 2 外辐射源数量对均方根误差的影响

由图 2 可知，随着目标飞行时间的增加和外辐射源数量的增多，发射信号对目标的覆盖范围逐渐扩大，定位精度也就越高。同一时刻的外辐射源数

量越多，误差越小。目标飞行时间在 15 s 之后的定位误差逐渐平稳，均方根误差约为 40 m。此时，较多数量的外辐射源设备成本高，并且没有显示出很大的高精度定位优势，所以选取 3 个外辐射源就能符合定位条件。

实验 2。设置外辐射源数量 $J = 3$ ，采样点数 $K = 8000$ ，信号的信噪比 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$ ，位置样本数 $P = 3000$ ，改变接收站数量 M ，进行关于 RMSE 随时间变化的实验，仿真结果如图 3 所示。

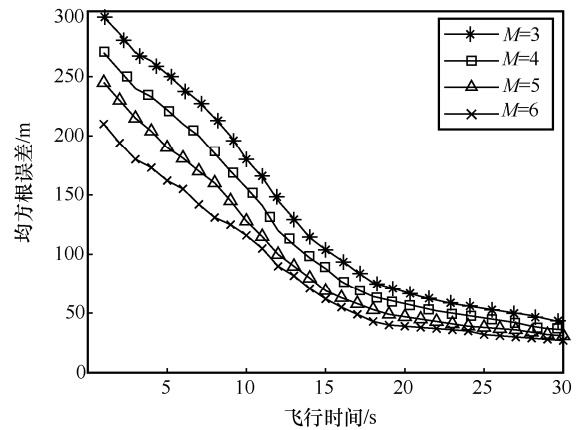


图 3 接收站数量对均方根误差的影响

由图 3 可知，随着目标飞行时间的增加和接收站数量的增多，算法对目标的融合定位精度越高。接收站数量在定位初始阶段对误差影响较大，但经过多次迭代之后，定位误差趋于稳定，此时选择接收站数量 $M = 5$ 即可满足定位需求。

实验 3。设置外辐射源数量 $J = 3$ ，接收站数量 $M = 5$ ，采样点数 $K = 8000$ ，改变位置样本数 P ，评估在不同信噪比下定位误差的变化，仿真结果如图 4 所示。

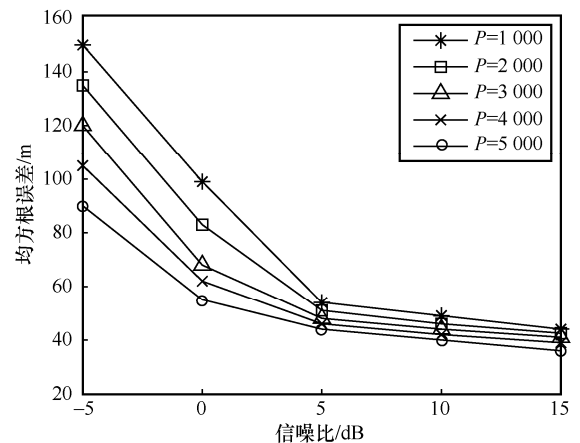


图 4 位置样本数对均方根误差的影响

由图 4 可知，同一信噪比下，位置样本数越多，定位精度越高。在监测三维空间范围内，随机产生的位置样本在目标真实位置附近分布越密，联合谱函数峰值估计的可靠性越高，但计算复杂度也会随之升高。在 5 dB 之后，各种样本数定位误差稳定在 50 m 以下，为此选取位置样本数 $P=3\ 000$ 即可达到高精度目标定位条件。

实验 4。设置外辐射源数量 $J=3$ ，接收站数量 $M=5$ ，位置样本数 $P=3\ 000$ ，改变采样点 K ，观察不同信噪比下误差的变化，仿真结果如图 5 所示。

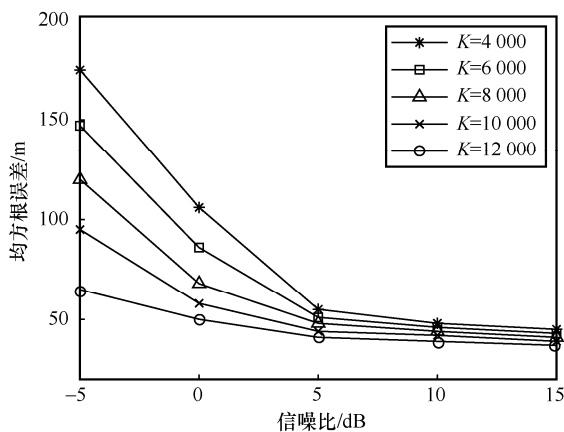


图 5 采样点对均方根误差的影响

由图 5 可知，同一信噪比下，采样点数越多，误差越小。采样点数越多，同一采样率下数据融合处理的稳定性越高，误差也就越小。在 5 dB 之后，采样点数对误差的影响不大。为了保证在低信噪比下也能实现良好的定位和采样效率，选取 8 000 个采样点即可达到高精度定位条件。

实验 5。由 2.2 节的分析可知，计算复杂度与采样点数 K 、位置样本数 P 、外辐射源数量 J 、接收站数量 M 有关。其中，起主要作用的是 K 和 P 。为探究参数 K 和 P 对计算时间成本的影响，保持 $J=3$ 和 $M=5$ 不变，测量在一个采样周期（即 $N=1\text{ s}$ ）内算法的运行时间，如表 2 所示。

由表 2 可知， K 值和 P 值越大，计算时间越长，时间成本越高，但 P 对算法运行时间的影响更大。当 $P<3\ 000$ 时，运行时间不大于 1.45 s，具备实时处理能力。

实验 6。根据前 5 个实验分析结果，可选取外辐射源数量 $J=3$ ，接收站数量 $M=5$ ，位置样本数 $P=3\ 000$ ，采样点数 $K=8\ 000$ ，信噪比 $\text{SNR}=5\text{ dB}$

为实现目标高精度定位的参数。最终目标运动轨迹及定位结果如图 6 所示。

表 2 K 和 P 对运行时间的影响

P	时间/s			
	$K=4\ 000$	$K=6\ 000$	$K=8\ 000$	$K=10\ 000$
1 000	0.28	0.30	0.33	0.36
2 000	0.83	0.84	0.85	0.86
3 000	1.35	1.40	1.43	1.45
4 000	1.80	1.90	1.96	2.00

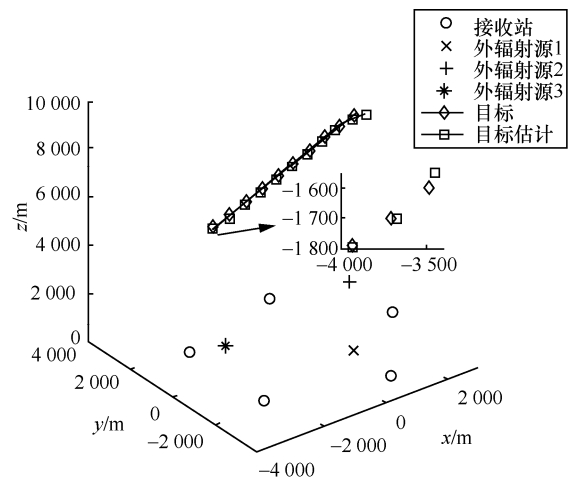


图 6 目标运动轨迹及定位结果

由图 6 可知，目标估计值逐渐收敛于真实值，平均定位精度可达 40 m。说明本文所提出的利用外辐射源对空中目标的直接定位算法能够实现高精度的定位跟踪效果。由表 2 可知，针对本次实验参数的设置，完成一次对空中目标 30 次数据航迹检测需用时 43.26 s，具备实时处理的能力。

实验 7。将本文算法与传统两步法和直接定位法对比，评估不同信噪比对 3 种算法定位误差的影响。其中，传统两步法的时延估计部分参考了文献[17]，该算法是基于相关熵的期望最大化高分辨率时差估计算法；定位部分参考了文献[14]，该算法是基于两阶段加权最小二乘法。为了保证 3 种算法对比的公平性，修改文献[14]算法，只考虑时延部分信息，不考虑相关速度信息。直接定位法参考了文献[28]，是基于遗传算法的外辐射源直接定位算法，该算法中种群大小和最大繁衍代数分别为 40 和 100，仿真中对此算法网格范围进行修改，网格大小设置为 20 m，对应网格点数为 400×400 。

3 种算法均使用 3 个发送站、5 个接收站对目标进行定位，外辐射源信号为频率调制信号，信号带宽为 100 kHz，基带信号采样率为 4 MHz，位置样本数均为 3 000。具体仿真结果如图 7 所示。由均方根误差曲线可知，在中高信噪比条件下，信号受外界噪声干扰相对较弱，时延和位置等参数估计难度低，3 种算法都可以达到良好的定位效果。但在低信噪比情况下，空中目标散射到地面接收站的信号微弱，多径时延分辨率大幅度下降，传统两步法对多径时延精确估计难度变大，从而导致定位性能大幅下降。而直接定位法只考虑了地面直达路径和目标散射路径而忽略了地面多径问题，定位结果相对传统两步法有所改善但与本文算法相比误差偏大。

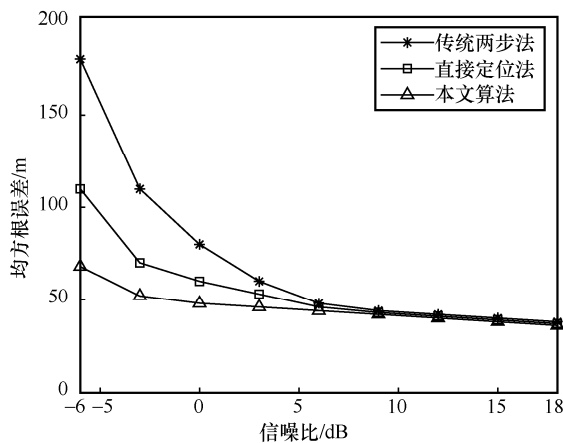


图 7 不同定位算法对比

4 结束语

本文提出一种利用外辐射源广播信号对空中目标直接定位的算法。通过构建多发多收的系统模型，利用分布式多站同步采集数据，直接构造包含目标位置信息的联合匹配函数。通过建立三维空间坐标位置样本及设计重采样算法，对匹配函数峰值进行搜索，进而得到对空中目标位置的估计，有效抑制了地面直达波和多径的影响。经过仿真实验分析，本文算法在低信噪比情况下仍然具备较高的定位精度，能够极大地丰富空中目标监测定位技术手段，具有重要现实意义和价值。

参考文献：

[1] 万显荣, 易建新, 占伟杰, 等. 基于多照射源的被动雷达研究进展与发展趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(6): 939-958.

WAN X R, YI J X, ZHAN W J, et al. Research progress and development trend of the multi-illuminator-based passive radar[J]. Journal of Radars, 2020, 9(6): 939-958.

[2] 隋金坪, 刘振, 刘丽, 等. 雷达辐射源信号分选研究进展[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 418-433.

SUI J P, LIU Z, LIU L, et al. Progress in radar emitter signal deinterleaving[J]. Journal of Radars, 2022, 11(3): 418-433.

[3] 赵勇胜, 胡德秀, 靳科, 等. 基于 FRT-MLVD 的无源雷达机动目标徙动补偿算法[J]. 通信学报, 2019, 40(7): 95-103.

ZHAO Y S, HU D X, JIN K, et al. Migration compensation algorithm for maneuvering target in passive radar based on FRT-MLVD[J]. Journal on Communications, 2019, 40(7): 95-103.

[4] 蔡明明, 王运锋. 基于扩展卡尔曼滤波的时差定位算法[J]. 现代雷达, 2020, 42(4): 50-54.

CAI M M, WANG Y F. Time difference location algorithm based on Kalman filter[J]. Modern Radar, 2020, 42(4): 50-54.

[5] YAN Q F, SUN F D. Research on multi-platform time difference location technology[C]//Proceedings of 2020 IEEE 5th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 813-817.

[6] 秦兆涛, 王俊, 魏少明, 等. 基于目标高度先验信息的多站时差无源定位方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(9): 2219-2226.

QIN Z T, WANG J, WEI S M, et al. Passive localization using TDOA measurements from multiple sensors based on priori knowledge of target altitude[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(9): 2219-2226.

[7] 曲明超, 司伟建, 袁雅芝. 基于不完全重合信号的单快拍 DOA 估计算法研究[J]. 通信学报, 2021, 42(12): 88-95.

QU M C, SI W J, YUAN Y Z. Research on single snapshot DOA estimation algorithm based on incompletely overlapped signal[J]. Journal on Communications, 2021, 42(12): 88-95.

[8] 张齐林, 李方伟, 王明月. 时间反演联合 TOA 测距的室内指纹定位技术[J]. 信号处理, 2021, 37(5): 862-869.

ZHANG Q L, LI F W, WANG M Y. Indoor fingerprint positioning technology based on time reversal and TOA ranging[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(5): 862-869.

[9] 邓丽娟, 张展, 魏平, 等. 分布式 MIMO 雷达中仅使用多普勒频移的直接定位技术[J]. 信号处理, 2018, 34(11): 1377-1384.

DENG L J, ZHANG Z, WEI P, et al. Direct position determination using merely Doppler frequency shifts in distributed MIMO radar[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(11): 1377-1384.

[10] 黄翔东, 冼弘宇, 闫子阳, 等. 时-空欠采样下的频率和 DOA 联合估计算法[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 21-28.

HUANG X D, XIAN H Y, YAN Z Y, et al. Joint estimation of frequency and DOA with spatio-temporal under sampling[J]. Journal on Communications, 2016, 37(5): 21-28.

[11] LIU C F, YUN J W, SU J. Direct solution for fixed source location using well-posed TDOA and FDOA measurements[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(4): 666-673.

[12] GUAN H L, ZHANG S S, WANG W Q. Localization deception performance of FDA signals under passive bi-satellite reconnaissance[J]. Science China Information Sciences, 2021, 64(9): 1-12.

[13] WANG Y B, LIANG X L, ZHANG J Q, et al. Robust TDOA/FDOA estimation from emitter signals for hybrid localization using UAVs[J]. Defence Technology, 2022, 18(1): 81-93.

- [14] SONG H B, WEN G J, ZHU L X, et al. A novel TSWLS method for moving target localization in distributed MIMO radar systems[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2210-2214.
- [15] 黎英云. 微弱多径信号时延估计技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
LI Y Y. Research on time delay estimation technology of weak multipath signal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [16] 张宇. 基于互相关的无源时差定位研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
ZHANG Y. Research on passive TDOA location based on cross-correlation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019.
- [17] 李森, 王基福, 林彬. 脉冲噪声环境下基于相关熵的多径 TDOA 估计算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(2): 289-295.
LI S, WANG J F, LIN B. A multipath TDOA estimation algorithm based on correntropy under impulsive noise environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(2): 289-295.
- [18] 梁加洋, 赵拥军, 赵闯, 等. 利用约束加权最小二乘的单站外辐射源时差定位算法[J]. 信号处理, 2017, 33(6): 880-886.
LIANG J Y, ZHAO Y J, ZHAO C, et al. Constrained weighted least squares algorithm for single-observer TDOA location estimation using illuminators of opportunity[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(6): 880-886.
- [19] YANG X, YE Y X. Geometric dilution of precision for far-distance TDOA location of shortwave[C]//Proceedings of 2021 2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 60-64.
- [20] WEISS A J. Direct geolocation of wideband emitters based on delay and Doppler[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(6): 2513-2521.
- [21] 吴癸周, 郭福成, 张敏. 信号直接定位技术综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(6): 998-1013.
WU G Z, GUO F C, ZHANG M. Direct position determination: an overview[J]. Journal of Radars, 2020, 9(6): 998-1013.
- [22] WANG Y L, WU Y, YI S C. An efficient direct position determination algorithm combined with time delay and Doppler[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2016, 35(2): 635-649.
- [23] 卢铭迪. 以卫星信号为外辐射源的直接定位方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LU M D. Research on direct positioning method with satellite signal as external radiation source[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [24] BAR-SHALOM O, WEISS A J. Direct positioning of stationary targets using MIMO radar[J]. Signal Processing, 2011, 91(10): 2345-2358.
- [25] TIRER T, WEISS A J. High resolution direct position determination of radio frequency sources[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(2): 192-196.
- [26] WANG S L, LI P C. MVDR-based coherence weighting for

high-frame-rate adaptive imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(10): 2097-2110.

- [27] HUANG Z Y, WU J. Multi-array data fusion based direct position determination algorithm[C]//Proceedings of 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. Piscataway: IEEE Press, 2015: 121-124.
- [28] 宋科康, 冯文涛. 采用 DIRECT 算法的外辐射源雷达高效直接定位方法[J]. 信号处理, 2020, 36(1): 149-154.
SONG K K, FENG W T. An efficient method of direct position determination of passive radar with DIRECT algorithm[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(1): 149-154.

[作者简介]



夏楠 (1983-), 男, 辽宁大连人, 博士, 大连工业大学副教授, 主要研究方向为通信信号处理和无线电定位技术等。



高丹阳 (1997-), 女, 河北唐山人, 大连工业大学硕士生, 主要研究方向为无源雷达定位和信号处理等。



邢宝辉 (1996-), 女, 河北承德人, 大连工业大学硕士生, 主要研究方向为短波信号监测和定位技术等。



王亚宁 (1998-), 男, 辽宁朝阳人, 大连工业大学硕士生, 主要研究方向为神经网络和目标定位监测等。