基于无线传感器的无线电监测设备干扰源定位方法

袁细祥，王　蒙，万　瑞，黄志佳，黄　宏

（湖北华电江陵发电有限公司，湖北 荆州 434100）

摘　要　复杂城市、野外等电磁场景下，传统固定式无线电监测设备存在部署盲区大、多径干扰误差高、动态干扰追踪滞后等缺陷，难以实现干扰源快速精准排查。本文以分布式无线传感器网络为感知载体，搭建多节点协同无线电监测架构，剖析传感器网络下干扰信号传播特性与传统定位算法局限性，设计噪声抑制、多径补偿一体化信号预处理方案，依托多传感器多维特征数据创新性提出适配型干扰源定位方法，旨在为相关工作人员提供有益参考。

关键词　无线传感器；无线电监测；干扰源定位；分布式协同；电磁多径效应

中图分类号：TN98；TP212.9　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.010

0　引言

随着5G规模化商用、物联网海量终端落地以及低空无线电业务快速发展，空间电磁频谱使用密度持续攀升，杂散辐射、非法私设电台、设备电磁泄漏等各类无线电干扰事件频发，直接威胁民航导航、政务专网、移动通信等关键业务稳定运行。传统无线电干扰监测多依靠大型固定监测站定点采集频谱数据，监测点位建设成本高、区域覆盖灵活性不足，面对城市高楼遮挡、山区偏远地带极易出现监测盲区，且单站监测模式无法同步获取多维度信号参数，对多干扰源混叠场景分辨能力较弱。无线传感器凭借低功耗、微型化、可随机密集组网的技术优势，能够在监测区域内分布式布设，同步完成全域范围内干扰信号场强、时延、相位、角度等参数采集，依靠多节点协同运算实现干扰位置逆向求解。

1　无线传感器无线电监测系统架构与干扰定位基础机理

1.1　分布式无线传感器监测系统分层架构

分布式无线传感器无线电监测系统采用三层递进式架构设计，从前端信号采集到后端数据解算实现全链路协同运行，彻底摆脱传统监测设备定点部署的空间约束[1]。位于最前端的感知层由大量搭载射频接收模块的微型传感器节点构成，节点可依托自组网模式灵活布设在道路、楼宇、野外等各类区域，每一个传感器预先完成地理位置标定，能够同步接收指定频段内无线电信号，实时提取干扰信号的接收场强、到达时间、入射角度、载波相位等多维原始特征数据，同时自带轻量化滤波单元完成前端粗降噪处理。传输层依托LoRa、WiFi等无线通信方式搭建多跳传输链路，各个传感器节点将采集的信号特征数据包进行压缩封装后逐级转发至汇聚节点，在传输过程中通过时间同步机制统一所有节点采样时钟，规避时钟偏移引发的参数时序误差，保障多节点数据具备时空对齐特性。后台解算管控层作为系统核心枢纽，集中接收全网传感器回传的标准化监测数据，依次完成数据清洗、异常值剔除、多径误差补偿等预处理操作，结合预设定位数学模型开展迭代运算，最终输出干扰源精准地理坐标、运动轨迹以及干扰类型识别结果，同时具备电磁态势可视化、越界干扰自动告警等拓展功能。

1.2　无线电干扰信号空间传播与定位底层机理

电磁波在自由空间与复杂城市、山地等非视距环境中的传播衰减规律，是依托无线传感器实现干扰源逆向定位的物理理论基础[2]。任意一个无线电干扰源向外辐射电磁波时，空间内不同位置部署的传感器节点会在不同时刻接收到同一组干扰信号，受传输距离、建筑物遮挡、大气散射等因素影响，各节点获取的信号幅值、传输时延、入射方向会呈现可量化的差异化特征。在所有传感器节点地理位置已知、全网时钟严格同步的前提下，后台终端可以选取三组及以上节点的信号特征参数构建方程组，结合电磁波衰减模型、信号时延传播模型、阵列测向模型完成联合求解，以此反推干扰源的

作者简介：袁细祥（1976-），男，专科，工程师，研究方向：无线电设备。

二维平面坐标。非视距场景下电磁波会产生反射、衍射引发多径效应，传感器接收到的信号包含直射分量与多条反射分量，极易造成特征参数畸变，这就需要依靠多节点冗余观测数据做误差拟合修正，通过算法迭代剔除异常观测值，不断缩小坐标解算误差区间，最终实现静态干扰源定点锁定与动态干扰源连续轨迹追踪。

1.3 传统定位算法在传感器监测场景下的应用局限

传统单一特征参数定位算法在分布式无线传感器组网监测模式中，极易受复杂电磁环境制约出现定位失效、精度骤降等问题。基于接收信号强度 RSS 的定位方式依托电磁波衰减模型估算节点与干扰源间距离，在多遮挡区域中多径衰落会大幅改变信号衰减系数，仅依靠场强数据极易产生数十米级定位偏差，且无法区分多个近距离同频干扰源。基于信号到达时间 TOA 的定位方案对全网时间同步精度要求极高，微型传感器硬件时钟存在固有微小偏移，若不做时钟校准处理，微小的时间误差经过距离换算后会形成极大的定位误差，硬件同步改造会显著提升传感器部署成本。到达角度 AOA 测向定位需要每个传感器搭载天线阵列，微型传感器受体积、功耗限制难以集成高精度阵列天线，单节点测向角度误差会直接传导至最终定位结果，稀疏布设场景下定位收敛速度较慢[3]。

2 无线传感器监测下干扰信号预处理关键技术

2.1 基于自适应阈值的传感器原始监测数据降噪处理

传感器硬件电路热噪声、环境射频底噪会混杂在干扰信号原始采样数据中，若直接将含噪参数代入定位模型运算，噪声扰动会不断放大坐标求解误差，降噪预处理是保障后续定位精度的前置核心环节。本文采用自适应滑动阈值降噪算法对全网传感器采集的时域频谱数据做分段处理，首先统计各节点静默时段内环境底噪的均值与方差，动态设置随频段、时段变化的噪声判定阈值，将幅值低于阈值的采样点直接判定为无效噪声数据予以剔除。针对短暂脉冲型突发干扰噪声，引入滑动窗口均值滤波算法对连续多帧频谱采样数据做平滑处理，在保留干扰信号有效幅值、时延特征的前提下滤除随机脉冲噪声；对于个别传感器因硬件故障、传输中断产生的缺失数据，采用相邻同组网节点的时序特征插值补全，避免局部数据缺失造成定位方程组无解，完成降噪后的标准化特征数据集可直接用于后续多算法联合定位运算。

2.2 非视距场景下多径传播误差补偿修正技术

城市楼宇密集、山林遮挡等非视距传播场景产生的多径效应，是造成传感器信号特征参数畸变、定位精度衰减的主要环境因素，必须通过误差补偿算法对观测参数进行校正[4]。首先依托传感器网络拓扑结构划分视距与非视距观测节点，利用残差统计法对每一组节点观测距离数据做拟合检验，将残差超出置信区间的节点标记为非视距观测节点；针对该类节点引入高斯分布误差模型量化多径带来的时延、场强偏移量，通过加权修正方式对原始观测参数做反向补偿，削弱反射、衍射路径带来的参数畸变影响。同时，采用多节点冗余加权策略，提升视距条件下传感器观测数据在定位模型中的权重占比，降低非视距节点异常参数对最终坐标解算结果的干扰，经过多径补偿后的观测参数能够大幅缩小定位解算的误差收敛区间，显著提升复杂遮挡场景下干扰源定位稳定性。

2.3 全网传感器节点时钟同步与坐标校准方法

分布式无线传感器分散布设的部署特点，极易引发节点本地时钟不同步、人工标定地理位置存在偏差两类系统误差，两类误差会直接破坏多节点观测参数的时空一致性，造成定位模型求解失效。针对时钟同步问题，采用汇聚节点为主时钟源的双向时间同步协议，所有传感器节点周期性与汇聚节点完成时间戳交互，通过计算收发双向传输时延修正各节点本地时钟偏移量，将全网时钟同步误差控制在纳秒级别，满足时延类定位算法的高精度时序要求。针对传感器地理位置标定误差，采用区域多点基准锚节点校准方案，选取监测区域内三个以上已知精确坐标的锚节点，通过锚节点间距离观测值对周边普通传感器坐标做迭代校正，剔除部署时 GPS 定位、人工标注产生的几米级坐标偏差，从系统底层消除时空基准不一致带来的定位固有误差，为四类新型干扰源定位方法提供精准可靠的输入数据集。

3 基于无线传感器的无线电监测设备干扰源定位方法分析

3.1 多特征加权融合协同定位法——面向多源同频混叠干扰场景

多特征加权融合协同定位法依托传感器采集的场强、时延、测向三类异构信号特征，解决多干扰源同频叠加时单一特征算法信号解耦困难、定位混淆的技术难题[5]。该方法先通过盲源分离算法对全网接收的混叠干扰频谱做信号剥离处理，将混合时域信号拆解为多个独立干扰源的单路特征序列，分别提取每一路干扰对应的 RSS、TOA、AOA 三组观测参数；依据不同场景下各类特征参数的误差统计特性动态分配权重，视距环境下提升 TOA 时间特征权重，非视距遮挡场景下适度放大 AOA 角度特征权重，通过加权最小二乘法

构建多特征联合定位目标函数。算法迭代求解过程中不断修正各特征权重系数，对多个干扰源坐标分别做收敛求解，既利用多维度观测数据弥补单一特征算法的场景局限性，又依托盲源分离技术实现多干扰源精准区分，有效解决城市密集电磁环境下同频多干扰源溯源定位难题，相比传统单一参数定位方式，多目标定位识别准确率可实现显著提升。

3.2 时序轨迹递推动态跟踪定位法——面向高速移动类无线电干扰场景

时序轨迹递推动态跟踪定位法针对车载、无人机搭载的移动型非法干扰设备，依托传感器连续时序采样数据实现干扰源实时位置更新与轨迹平滑拟合。不同于静态干扰单次坐标求解模式，该方法以固定时间片为单位连续采集多帧传感器监测特征数据，先利用前序多帧观测结果通过卡尔曼滤波算法完成干扰源运动状态预估计，构建包含位置、运动速度、航向角的状态转移方程；结合当前时刻全网传感器观测参数对预估计坐标做修正更新，剔除移动过程中瞬时多径噪声带来的位置跳变误差。同时，引入轨迹关联阈值策略，对连续多个时间片段的定位结果做轨迹匹配校验，避免短时信号遮挡造成定位目标丢失，在干扰源高速变速、变向运行工况下依旧可以输出平滑连续的运动轨迹，实现移动干扰源从出现、行进到消失全时段精准追踪，弥补传统静态定位算法只能单点定位、无法连续跟踪动态干扰的技术短板。

3.3 锚节点辅助差分修正定位法——面向弱信号远距离遮挡干扰场景

锚节点辅助差分修正定位法聚焦远距离遮挡环境下干扰信号衰减严重、传感器观测信噪比偏低导致的定位误差过大问题，借助区域高精度基准锚节点实现观测参数全局差分校正。该方法在监测区域边缘、高点位置布设若干经过精准坐标标定的锚节点，锚节点全程同步采集环境底噪与干扰参考信号，实时统计远距离传输过程中信号时延、场强的环境衰减偏移量；将所有普通传感器的原始观测参数与锚节点参考观测值做差分运算，抵消大气衰减、地形遮挡带来的全局系统性观测误差，完成差分校正后的参数代入定位模型开展坐标求解。

算法额外引入信噪比加权筛选机制，仅保留信噪比高于预设阈值的传感器观测数据参与定位运算，直接舍弃远距离弱信号下畸变严重的无效采样参数，在山区、城郊大范围遮挡弱信号场景中能够有效抑制远距离传输带来的定位偏移，大幅提升微弱无线电干扰信号的可定位距离与坐标求解精度。

3.4 拓扑自适应稀疏组网定位法——面向广域大范围稀疏部署监测场景

拓扑自适应稀疏组网定位法针对野外、偏远区域传感器布设密度低、节点分布不均匀导致的定位方程组收敛慢、有效观测数据不足的痛点，依托网络拓扑动态重构实现稀疏节点下的高精度定位。该方法首先基于各传感器地理位置构建区域无向拓扑网络，通过图论聚类方式将广域监测范围划分为若干局部子监测网络，在每个子网内选取观测质量最优的传感器组构建局部定位方程组；当局部节点数量不足时，自动调用相邻子网的冗余观测节点参与联合解算，同时采用约束加权最小二乘算法缩小稀疏观测下的坐标可行解区间。算法可根据干扰源所在位置动态调整参与运算的传感器组网拓扑结构，避免固定组网模式下边缘区域观测数据匮乏引发的定位失效，在广袤野外、边境等传感器稀疏布设场景下，既能降低大规模高密度部署带来的硬件成本，又可以依靠拓扑自适应组网方式充分挖掘全网冗余观测信息，实现广域范围内无线电干扰源低成本、高精度全域定位覆盖。

4 结束语

多特征加权融合协同定位法解决多源同频干扰混淆问题，时序轨迹递推动态跟踪定位法实现移动干扰连续溯源，锚节点辅助差分修正定位法适配遮挡弱信号场景，拓扑自适应稀疏组网定位法满足广域低成本监测需求。四类方法分别从信号特征、运动时序、环境误差、网络部署四个技术维度实现算法创新，充分发挥无线传感器分布式、灵活组网的技术优势，有效弥补传统定点无线电监测方式的应用短板。未来可结合人工智能算法对四类定位方法做融合优化，进一步提升极端电磁环境下干扰源自主识别、智能定位能力，为我国无线电频谱精细化监管、电磁空间安全防护提供坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 聂晓林.浅谈基于无线传感器网络的无线电监测设备干扰源定位方法[J].通讯世界,2026,33(03):39-41.
[2] 王奇,钱于声,陆敏,等.基于远距离无线电广域网的低功耗长距离无线传感器系统[J].电气技术,2026,27(02):32-39.
[3] 郭鹤凡,刘子豪.基于无线传感器的无线电监测设备干扰源定位方法[J].微处理机,2025,46(02):37-43.
[4] 梁仓,王党辉,梁晨旭,等.基于LCC-LCC/S可重构拓扑的无线充电系统在传感器网络中的应用[J].高电压技术,2025,51(03):1191-1205.
[5] 王拥兵,张志彬,张政,等.基于湖南航空无线电监测专网的干扰排查方案[J].中国无线电,2026(04):51-53.