

基于多蓝牙标签的双频微基站异常信号定位方法

王禹兮¹
WANG Yuxi

摘要

在双频微基站环境中，多种无线信号源的干扰信号会与蓝牙标签信号在频谱上产生重叠，干扰异常信号的检测与定位过程。因此，文章提出了一种基于多蓝牙标签的双频微基站异常信号定位方法。采用高精度信号接收器采集低频段与高频段的信号，通过分析找出双频段信号的差异和互补信息，提取出与异常信号相关的特征。输入到预先训练好的分类器中，实现异常信号检测。利用多个蓝牙标签发射的信号与双频微基站接收的异常信号之间的交互关系，结合优化定位算法，实现对异常信号源的精确定位，以此减少对蓝牙标签信号的干扰，提高信号接收的准确性和稳定性。结果表明，该方法的定位误差均控制在1 m以内，显著提升了定位准确性和精度，为双频微基站环境下的异常信号监管提供了有力的技术支持。

关键词

多蓝牙标签；微基站；信号定位；异常；双频

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.024

0 引言

微基站的稳定性和可靠性对于确保高质量的通信服务至关重要。在实际应用中，微基站可能会受到各种异常信号的干扰，不仅会降低通信质量，还可能对网络安全构成威胁。因此，准确高效地定位微基站中的异常信号源，对于保障通信网络的正常运行具有重要意义。

近年来，针对基站信号定位方法的研究取得了显著进展。王峰岷^[1]提出了一种基于改进FP-Growth算法的高速铁路GSM-R基站干扰源定位方法。但在检测和定位异常信号时，易遗漏或误判不同类型的干扰。夏得校等人^[2]则研究了一种基于圆形可重构智能超表面阵列的单基站定位方法。在复杂环境中，干扰信号会改变信号传播特性，使接收到的信号与实际信号有偏差，无法精准调整以聚焦定位目标信号。针对现有方法的不足，本文提出基于多蓝牙标签的双频微基站异常信号定位方法。

1 双频微基站信号采集

在双频微基站异常信号定位过程中，异常信号可能单独出现在低频段或高频段，也可能同时影响两个频段。由于两个频段信号的衰减系数和相位变化系数存在差异，因此，只有通过实际采集信号，才能准确了解信号状态。为此，本研究双频微基站信号采集采用高精度的信号接收器，同时接收并处理两个频段的信号。接收器采集到的信号以复数形式表

示，包含信号的幅度和相位信息。这种方式可以确保采集到的信号信息全面且准确。

在双频微基站信号采集阶段，利用双频微基站同时发射和接收信号。设双频微基站发射的信号分别为 f_1 和 f_2 ，其中 f_1 为低频段信号， f_2 为高频段信号^[3]。当 $f_1 < f_2$ 时，信号在传播过程中会受到障碍物、多径效应影响，导致信号强度、相位等参数发生变化。设原始信号强度为 A_0 ，经过传播路径后的信号强度为 A ，则信号强度的衰减可以表示为：

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (1)$$

式中： α 表示衰减系数； d 表示信号传播的距离。

信号在传播过程中，其相位也会经历变化。设原始信号的相位为 ϕ_0 ，而经过传播路径后的信号相位为 ϕ ，则相位的变化可以表示为：

$$\phi = \phi_0 + \beta d \quad (2)$$

式中： β 表示相位变化系数。

为精确采集这些在传播过程中可能发生变化的信号，双频微基站上配备了高精度的信号接收器。同时接收并处理低频段与高频段两个频段信号^[4]。信号接收器采集到的信号以复数形式呈现，其中包含了信号的幅度和相位信息^[5]。设接收到的 f_1 低频段信号和接收到的 f_2 高频段信号分别为：

$$S_1(t) = A_1(t) e^{j\phi_1(t)} \quad (3)$$

$$S_2(t) = A_2(t) e^{j\phi_2(t)} \quad (4)$$

式中： $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 分别表示两个频段信号的幅度； $\phi_1(t)$ 和 $\phi_2(t)$ 分别表示两个频段信号的相位。

1. 湖北科技学院 湖北咸宁 437000

通过上述方式完成了对双频微基站信号的采集工作,为后续的双频微基站异常信号检测奠定了坚实的基础。

2 双频微基站异常信号检测

采集的双频微基站信号中存在干扰信号与蓝牙标签信号重叠的现象,可能会导致后续定位出现偏差,无法准确获取有用信息。通过异常信号检测,可以识别并剔除这些干扰信号,确保后续定位的准确性。为此本研究利用双频段信号的差异性和互补性来检测异常信号,获取异常信号的幅度、相位、频谱特性、时域特性等方面的异常表现,为后续处理和定位提供依据。

设正常信号在两个频段上的幅度和相位差异分别为:

$$\Delta A = |A_1 - A_2| \quad (5)$$

$$\Delta \phi = |\phi_1 - \phi_2| \quad (6)$$

定义异常检测阈值为 θ_A 和 θ_ϕ 。当满足 $\Delta A > \theta_A$ 或满足 $\Delta \phi > \theta_\phi$ 时,则认为检测到异常信号。为进一步提升异常信号检测的准确性和可靠性,还结合了信号的频谱特性和时域特性综合判断^[6]。频谱特性揭示了信号在不同频率上的分布和强度,通过傅里叶变换,将时域信号转换为频域信号,能够深入分析其频谱特性^[7]。设时域信号为 $x(t)$,其傅里叶变换为 $X(w)$,则转换关系可表示为:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

式中: w 表示角频率; j 表示虚数单位。

信号的时域特性描述了信号随时间的变化规律。在异常信号检测过程中,将频谱特性和时域特性作为关键的特征量,输入到分类器或异常检测算法中,为后续的异常信号处理和定位工作提供了坚实的基础和可靠的依据。

3 基于多蓝牙标签的异常信号源精确定位方法

在双频微基站环境中,异常信号可能来源于多个不同的位置,而每个位置都对应着不同的潜在故障或干扰源^[8]。本研究利用多个蓝牙标签发射的信号与双频微基站接收的异常信号之间的交互关系,通过三角测量法或指纹定位法等算法,实现对异常信号源的精确定位,以此减少对蓝牙标签信号的干扰,提高信号接收的准确性和稳定性。

设蓝牙标签的坐标为 (x_i, y_i) ,其中, $i = 1, 2, \dots, n$; 双频微基站的坐标为 (X_j, Y_j) ,其中 $j = 1, 2$,则蓝牙标签到双频微基站的距离可以通过信号传播时间或信号强度等参数计算得到^[9]。设蓝牙标签到双频微基站 j 的距离为 d_{ij} ,则有:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - X_j)^2 + (y_i - Y_j)^2} \quad (8)$$

通过多个蓝牙标签与双频微基站之间的距离信息,构建一组非线性方程组,通过求解该方程组,可以得到异常信号源的坐标 (x, y) 。

在求解过程中,采用最小二乘法提高定位精度和鲁棒性^[10]。在定位问题中,将多个蓝牙标签到双频微基站的距离差作为观测值,通过最小二乘法求解目标位置。观测方程为:

$$d_{ij} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2} \quad (9)$$

最小二乘法的目标是最小化观测值与计算值之间的误差平方和:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2} - d_{ij} \right)^2 \quad (10)$$

通过求解 S 的最小值,能够得到异常信号目标位置的估计值。

低频段信号具有更好的穿透性,而高频段信号具有更高的分辨率。为此,本研究通过融合两个信号的定位结果,旨在进一步提高定位的准确性。设低频段信号的定位结果为 (x_1, y_1) ,高频段信号的定位结果为 (x_2, y_2) ,则融合后的定位结果可以表示为:

$$(x, y) = w(x_1, y_1) + (1 - w)(x_2, y_2) \quad (11)$$

通过上述过程成功获得了异常信号源的精确位置信息,为后续的故障排查和修复工作提供了强有力的支持。

4 对比实验

4.1 实验环境

将本文方法应用到某微基站运行环境中,对异常信号进行定位。通过对定位结果的分析,实现对该方法应用性能的检验。同时,考虑到实验的可对比性,将基于改进 FP-Growth 算法的定位方法设置为对照 A 组,将基于圆形可重构智能超表面阵列的定位方法设置为对照 B 组。同样在相同环境下,对微基站异常信号进行定位。

选择某高校环境作为实验环境,该校区内的食堂占地面积 1 000 m²。食堂建筑由地上三层与地下一层构成。在本次网络组建与测试活动中,选取食堂整体作为覆盖对象。为了实现这一目标,安装了 3 台 LTE Small Cell 设备,共同覆盖了大约 1 000 m² 的区域。采用 PTN 回传技术,PTN 提供了高达 1 Gbit/s 的带宽,并通过交换机划分为多个百兆接口,这些接口分别与 3 台 SmallCell 设备相连。基站方面接入了 EPC 系统。图 1 所示为 3 台微基站的分布位置及对应实景图。

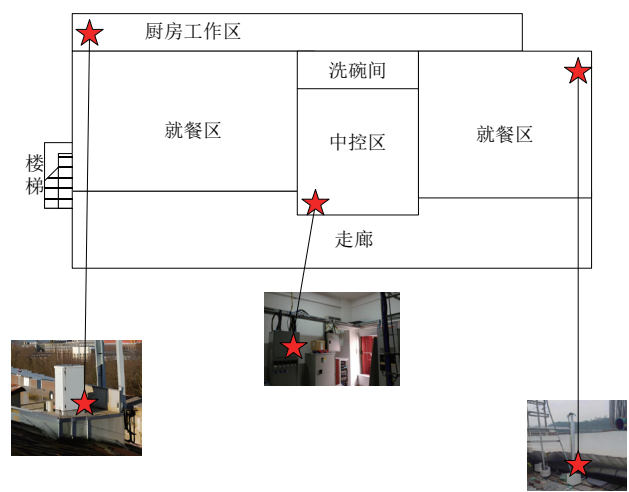


图 1 3 台微基站的分布位置及对应实景图

4.2 实验指标

实验构建了一个包含正常信号与多种类型异常信号的综合性数据库，具体数据库信息如表 1 所示。其中涵盖了不同频率、强度、调制方式等特征的信号，以确保实验的全面性和代表性。

表 1 数据库表

信号 ID	时间戳	频率 /MHz	强度 /dBm	调制方式	是否异常
S001	2023-10-01 08:00	2 100	-60	LTE	0
S002	2023-10-01 08:01	2 100	-70	NR	1
S003	2023-10-01 08:02	1 800	-65	GSM	0
S004	2023-10-01 08:03	2 600	-55	5G	1
S005	2023-10-01 08:04	2 100	-68	LTE	0

这些信号应涵盖不同的频率、强度、调制方式等特征，以确保测试的全面性和代表性。将 3 种待对比的方法分别应用于该数据集，进行异常信号的检测。图 2 所示为微基站覆盖区域内异常信号点分布示意图。

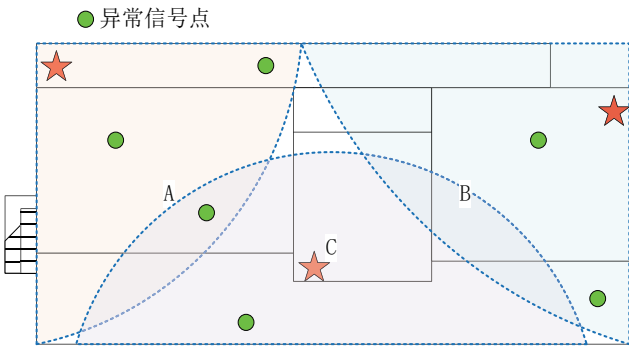


图 2 微基站覆盖区域内异常信号点分布示意图

从图 2 可以看出，在 3 个微基站覆盖区域内，共存在 6 个异常信号点。在实验室中，预设多个已知位置的信号发射源。使用高精度信号采集设备，在多个预设的测量点上收集来自各个信号源的数据。将 3 种方法分别应用于采集到的信号数据，利用各自的定位算法计算异常信号源的位置。

4.3 实验结果

对比 3 种定位方法检测到的微基站异常信号结果与实际情况，将得到的实验结果记录如表 2 所示。

表 2 3 种定位方法微基站异常信号检测结果

区域	实际异常信号数量(个)	实验组检测到异常信号数量 / 个	对照 A 组检测到异常信号数量 / 个	对照 B 组检测到异常信号数量 / 个
A	3	3	2	2
B	2	2	2	1
C	2	2	2	1

根据表 2 所呈现的实验数据分析，实验组在异常信号检测上表现出色，检测结果与实际观测值完全相符，准确性极高。而对照 A 组和对照 B 组的检测结果与实际情况存在偏差。实验组能有高准确性，是因其运用信号处理算法对采集信号进行异常检测，识别出重叠信号。不仅可有效区分正常与异常信号，还能在复杂信号环境中精准捕捉异常信号特征，为后续定位提供精确目标信息，保障了检测与定位过程的高可靠性和高精度。

对 3 种定位方法定位精度进行测定，并将得到的结果绘制成图 3~5 所示。

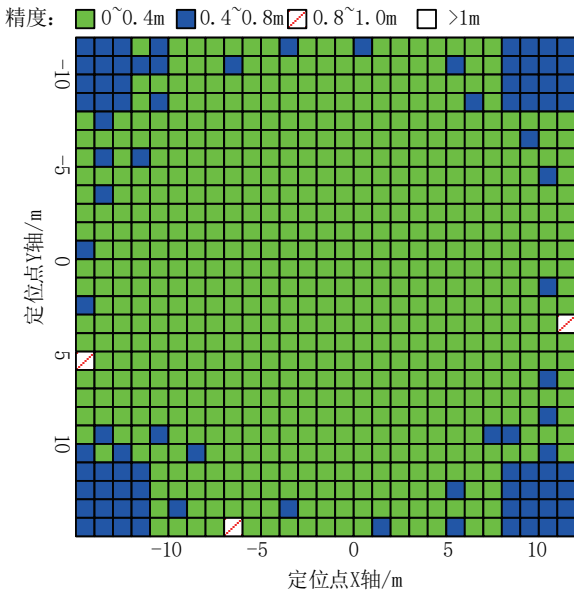


图 3 实验组定位精度 1 m 覆盖图

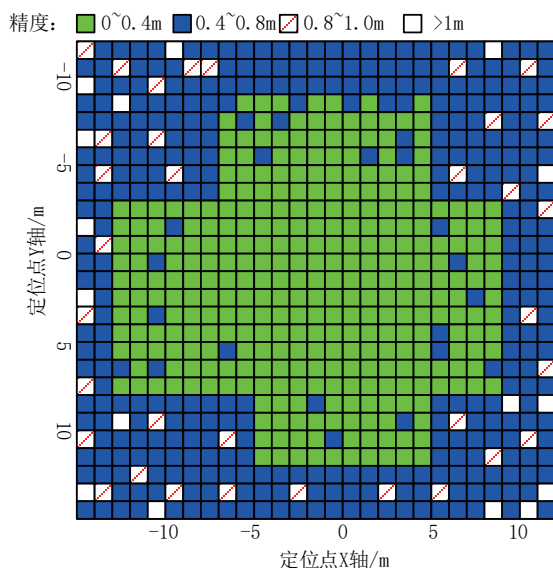


图4 对照A组定位精度1m覆盖图

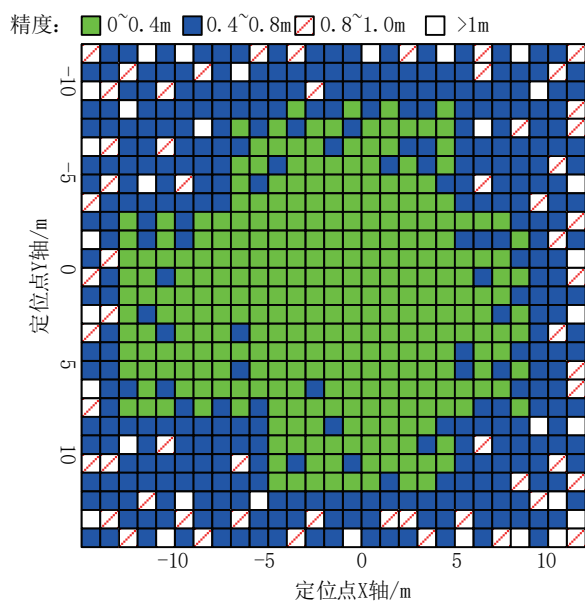


图5 对照B组定位精度1m覆盖图

根据图3~5所展示的实验数据分析,可以看到,实验组在定位精度上的表现明显优于对照A组和对照B组。实验组的所有定位点的误差均被严格控制在1m以内,实现了对整个测试区域的高精度全面覆盖。这一实验结果充分验证了实验组所采用的定位方法具有显著的高精度优势。实验组之所以能达到如此出色的性能,关键在于其依托的多蓝牙标签定位技术。利用这些信号间的相位差、时间差等关键参数,结合先进的算法进行数据深度处理和解析,最终实现对目标物体位置的高精度估算。

5 结语

本研究提出一种基于多蓝牙标签的双频微基站异常信号

定位方法。该方法融合蓝牙技术与双频信号特性,有效实现了微基站中异常信号源的精确定位。实验结果显示,该方法在提升定位精度和可靠性方面具有明显成效。

参考文献:

- [1] 王峰岷. 基于改进FP-Growth算法的高速铁路GSM-R基站干扰源定位方法[J]. 数字技术与应用, 2024, 42(10): 204-206.
- [2] 夏得校, 史琰, 李龙. 基于圆形可重构智能超表面阵列的单基站定位方法[J]. 移动通信, 2024, 48(4): 35-40.
- [3] 钟映春, 田志豪. 大型封闭空间中UWB定位基站拓扑的通用设计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2): 231-240.
- [4] 黄鑫, 张成炜, 韦周旺, 等. 基于UWB-PDOA的少基站自适应定位系统研究[J]. 测控技术, 2024, 43(5): 85-92.
- [5] 刘云天, 史鑫磊. 多基站非圆信号直接定位: 降维PM与泰勒补偿[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(6): 725-733.
- [6] 黄维. 基于果蝇优化算法的5G网络基站选址研究[J]. 电信科学, 2023, 39(10): 120-127.
- [7] 许志强, 任建磊, 张亚军, 等. 国产化背景下高精度光学双基站空间定位测量系统设计[J]. 激光与红外, 2024, 54(4): 612-619.
- [8] 李旋, 杨海效, 李济源, 等. 基于精度因子与距离残差的加权最小二乘算法在DTMB辅助北斗定位中的应用[J]. 高技术通讯, 2024, 34(7): 705-713.
- [9] 蓝敏益, 高成发. 基于智能手机自设基站的相对定位分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(5): 468-472.
- [10] 徐文杰, 张贞凯. 一种改进组合加权的TDOA室内二维定位算法[J]. 电讯技术, 2024, 64(6): 936-944.

【作者简介】

王禹兮(2004—), 女, 吉林长春人, 本科在读, 研究方向: 电子信息科学与技术。

(收稿日期: 2025-02-07 修回日期: 2025-06-10)