

# 基于超宽带AOA估计和多源信息融合的变电站 室内外无缝组合定位方法

周航帆, 马子劼, 臧志斌, 马胜, 张永欣

(国网思极位置服务有限公司, 北京 102200)

**摘要:**为了解决变电站复杂的室内外环境中,单一目标定位方法精度低的问题,提出基于超宽带到达角(angle of arrival, AOA)估计和多源信息融合的变电站室内外无缝组合定位方法。通过基于MIMU的航迹推测指定位置确定比率(position determination ratio, PDR)定位方法和基于超宽带AOA估计的目标定位方法获得定位结果;创新性地使用卡尔曼滤波器估计变电站室内外定位误差,引入卡尔曼增益补偿定位误差,以多源定位误差对比估计、补偿修正的方式,完成变电站室内外无缝组合定位。研究结果证实,此方法对变电站室内外静态目标、动态目标的位置定位误差均较小,仅有0.001 m,可实现变电站室内外无缝组合式精准定位,可为变电站定位管理工作提供技术支撑。

**关键词:**超宽带;AOA估计;多源信息融合;变电站;室内外;无缝组合定位

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)08-0115-05

## Seamless Indoor and Outdoor Combination Positioning Method for Substations Based on Ultra Wideband AOA Estimation and Multi-source Information Fusion

ZHOU Hangfan, MA Zijie, ZANG Zhibin, MA Sheng, ZHANG Yongxin

(State Grid Location Based Service Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low accuracy of single target localization methods in the complex indoor and outdoor environment of substations, a seamless combination localization method for indoor and outdoor substations based on ultra wideband activity-on-arrow (AOA) estimation and multi-source information fusion is proposed. It obtains positioning results through MIMU based trajectory estimation position determination ratio (PDR) positioning method and ultra wideband AOA estimation based target positioning method. Innovatively uses kalman filters to estimate indoor and outdoor positioning errors in substations, introduces kalman gain compensation for positioning errors, and completes seamless combination of indoor and outdoor positioning in substations through comparative estimation and compensation correction of multi-source positioning errors. The research results confirm that this method has small positioning errors for both static and dynamic targets inside and outside the substation, with only 0.001 m. It can achieve seamless combination of indoor and outdoor precise positioning in the substation and provide technical support for substation positioning management work.

**Keywords:** ultra wideband; angle of arrival estimation; multi source information fusion; substation; indoor and outdoor; seamless combination positioning

## 0 引言

变电站的安全运行对于电网的稳定运行至关重要<sup>[1-2]</sup>。传统的视频监控系统虽然可以监控变电站工作人员和巡检机器人的动态变化位置信息,但是在变电站动态目标定位问题中存在一定的局限性,无法精准定位目标。因此,需要设计一种能够实现变电站室内外精准定位的系统,以提高变电站的安保工作效率以及运行状态的监测能力。

分析已有研究文献可知,邹俊平等研究一种单双频

GPS接收机精密单点定位方法。仅使用卫星信号便可完成定位,在室外环境中,GPS定位覆盖范围显著,但天气会对此方法定位效果存在一定干扰,阴雨天气中,卫星信号会遭到云层影响,导致卫星信号强度出现衰减变化,便不能抵达地面,从而导致定位误差变大<sup>[3]</sup>。曹鸿基等提出了室内自适应定位方法。此方法虽在实验中被证实定位效果好,但如果室内环境中存在障碍物,此方法对目标位置的定位精度就会受到影响<sup>[4]</sup>。

超宽带(ultra wideband, UWB)技术通常情况下带宽大于1 GHz<sup>[5]</sup>。在带宽的作用下,UWB技术数据传输率快,且具备较好的穿透力,使其抗扰性得到优化,但如果变电

\*基金项目:国网信息通信产业集团有限公司两级协同研发项目(536821210006)

收稿日期:2023-10-19

站室内环境复杂,此技术遇到障碍物,也会出现数据传输附加延迟问题,从而影响目标位置的定位效果<sup>[6]</sup>。由此可见,在复杂环境中,单一目标定位方法并不能实现目标位置的精准定位。为此,本文提出基于超宽带AOA估计和多源信息融合的变电站室内外无缝组合定位方法。基于超宽带技术,采用AOA估计方法,对变电站室内外目标进行位置定位。计算基于超宽带AOA估计的目标定位方法和MIMU航迹推测PDR定位方法的定位结果,引入多源信息融合机制将两种定位方法的结果进行融合,提高定位精度。使用卡尔曼滤波器,对定位误差进行估计和补偿,进一步提高定位精度。以多源定位信息融合的方式,完成变电站室内外无缝组合定位。

### 1 变电站室内外无缝组合定位方法设计

首先,基于超宽带AOA估计进行目标定位,其次,基于MIMU进行航迹推测PDR定位,再次引入卡尔曼滤波器,对两种方法定位结果的误差进行估计和优化,以降低定位结果误差。

#### 1.1 基于超宽带AOA估计的目标定位

UWB技术具有显著的时间分辨率、空间分辨率,其在使用过程中,超宽带系统可朝变电站室内外环境中,需定位目标发射与接收极窄脉冲,然后提取需定位目标信号的到达角度数据<sup>[7]</sup>,由位置解算算法求解便可获取目标的具体坐标数据。在UWB技术使用中,基于到达角度的定位解算方法(AOA算法)操作相对简单<sup>[8]</sup>,为此,使用基于超宽带AOA估计的定位方法,对变电站室内外目标进行解算定位。

将变电站室内外目标设成需定位节点,此节点可使用天线阵列,判断已知坐标的参考节点(基站)发送端UWB信号的到达方向 $\beta_m$ ,运算节点之间相对方向角 $\tan\beta_m$ ,便可解算提取需定位节点的坐标 $(X', Y')$ <sup>[9]</sup>。则:

$$\tan \beta_m = \frac{Y_m - Y'}{X_m - X'} \quad (1)$$

式中, $X', Y'$ 是变电站室内外目标横坐标、纵坐标的定位结果; $X_m, Y_m$ 是基站 $m$ 的横坐标、纵坐标已知数值<sup>[10]</sup>。基于超宽带AOA估计的目标定位方法技术架构如图1所示。

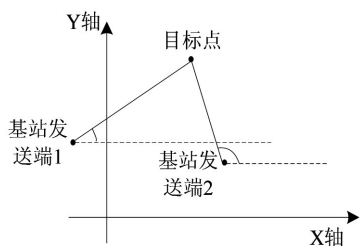


图1 基于超宽带AOA估计的目标定位方法

基于超宽带AOA估计的目标定位方法,可结合变电

站需定位目标、基站之间的角度信息,运算目标点的具体位置信息。

#### 1.2 基于MIMU的航迹推测PDR定位

基于MIMU的航迹推测PDR定位方法的技术架构如图2所示。

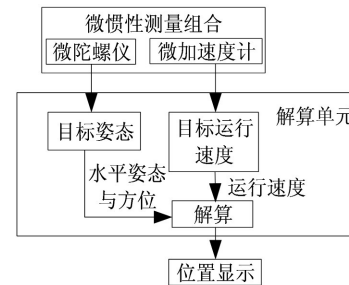


图2 基于MIMU的航迹推测PDR定位方法的技术架构

MIMU属于惯性导航系统,其可使用微型陀螺仪,构建笛卡尔坐标系<sup>[11]</sup>,通过加速度计获取变电站室内外目标运行的加速度数据,把获取的加速度数据转换在空间坐标系中,由目标航迹推算PDR方法,便可解算确定变电站室内外目标的运行位置与姿态<sup>[12]</sup>,此方法对近距离目标定位效果较好。

基于MIMU的航迹推测PDR定位方法使用时,需要将微惯性测量组合中的加速度计、陀螺仪直接和载体连接。变电站室内外目标的姿态信息,由微型陀螺仪采集计算。微加速度计用于采集室内外目标的加速度数据<sup>[13]</sup>。微惯性测量组合将采集的姿态数据、加速度数据传输于定位解算单元,由航迹推测PDR定位方法,完成变电站室内外目标定位<sup>[14]</sup>。

航迹推测PDR定位方法可结合目标运行的加速度数据,以步态检测的方式计算目标运行步数,将步数和目标步长相乘,便可获取某段时间内的运行距离值,结合目标运行姿态数据,便可获取室内外目标位置信息<sup>[15]</sup>。

设置初始时间 $T_0$ 中,变电站室内外目标初始位置坐标是 $(X_0, Y_0)$ , $X, Y$ 依次是笛卡尔坐标系中横坐标与纵坐标。变电站室内外目标运行距离、姿态感知数据中的朝向角分别是 $R_0, \alpha_0$ ,则下一时间段 $T_1$ 的目标位置 $(X_1, Y_1)$ 是:

$$\begin{cases} X_1 = X_0 + R_0 \times \sin \alpha_0 \\ Y_1 = Y_0 + R_0 \times \cos \alpha_0 \end{cases} \quad (2)$$

航迹推测PDR定位方法的技术架构如图3所示。

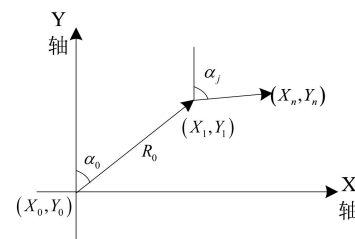


图3 航迹推测PDR定位方法的技术架构

结合图3所示的航迹推测PDR定位方法技术模式,便可获取变电站室内外目标在第 $n$ 个时间段 $t_n$ 的位置解算结果 $(X_n, Y_n)$ :

$$\begin{cases} X_n = X_{n-1} + R_n \times \sin \alpha_n = X_0 + \sum_{j=0}^{n-1} R_j \times \sin \alpha_j \\ Y_n = Y_{n-1} + R_n \times \cos \alpha_n = Y_0 + \sum_{j=0}^{n-1} R_j \times \cos \alpha_j \end{cases} \quad (3)$$

式中, $R_j, \alpha_j$ 是变电站室内外目标第 $j$ 次运行的距离长度与朝向角。至此,完成变电站室内外目标的定位。

### 1.3 多源信息融合的无缝组合定位

由于上节基于超宽带AOA估计和基于MIMU航迹推测PDR两种定位方法获得的结果存在较大误差,本文引入卡尔曼滤波器,对两种方法定位结果的误差进行估计和优化,以降低定位结果误差,提高定位的准确性和稳定性。将获得的变电站室内外定位结果 $(X_n, Y_n)$ 、 $(X', Y')$ 输入卡尔曼滤波器,以多源定位信息融合的方式,完成变电站室内外无缝组合定位。

#### 1.3.1 多源信息融合

基于多源信息融合的无缝组合定位方法的技术架构如图4所示。

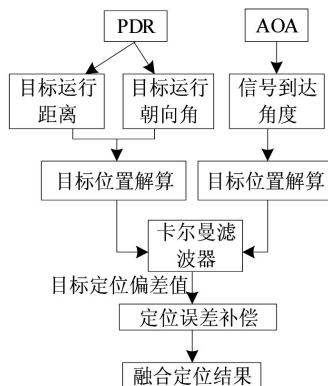


图4 基于多源信息融合的无缝组合定位方法

将变电站室内外2种方法的目标定位结果在二维平面中,执行多源信息融合。

#### 1.3.2 卡尔曼滤波器估计

需要将航迹推测PDR定位结果、超宽带AOA定位结果执行求差处理,定位差值设为 $\partial Q(t)$ ,求解其绝对值,则:

$$|\partial Q(t)| = |W_t - L_t| \quad (4)$$

$$\Omega(t) = \begin{cases} 1 & |\partial Q(t)| > \mu q \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Omega(t)$ 是变电站室内外2种方法的目标定位差值判断门限值,其数值是1,则航迹推测PDR定位结果、超宽带AOA定位结果存在较大的偏差;数值是0时,两个定位结果准确。 $\mu, q$ 分别是经验阈值、定位误差均值和。 $W_t, L_t$ 分别是变电站室内外目标定位的状态向量、观测向量。

将航迹推测PDR定位结果中,设置目标的运行速度与位置统称为状态向量 $W_t$ :

$$W_t = [\partial q_{t,x}, \partial q_{t,y}, \partial v_{t,x}, \partial v_{t,y}]^T \quad (6)$$

式中, $\partial q_{t,x}, \partial q_{t,y}$ 分别表示航迹推测PDR定位时,目标定位结果的横坐标误差、纵坐标误差; $\partial v_{t,x}, \partial v_{t,y}$ 分别表示变电站室内外目标定位结果的横向速度误差、纵向速度误差。则 $t+1$ 时刻变电站室内外目标定位时,目标位置状态方程是:

$$W_{t+1} = G W_t + v_t \quad (7)$$

式中, $G, \varpi_t$ 分别表示航迹推测PDR定位时,室内外目标位置状态转移矩阵、噪声信息, $v_t$ 表示室内外目标的纵向速度。在定位周期 $\Delta t$ 中,室内外目标位置状态转移矩阵 $G$ 是:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

设置超宽带AOA估计变电站室内外目标位置时,超宽带AOA估计结果中,室内外目标位置为观测向量 $L_t$ :

$$L_t = \begin{bmatrix} \Delta q_{t,x} \\ \Delta q_{t,y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

观测方程为

$$L_t = K W_t + v_t \quad (10)$$

式中, $K$ 是变电站室内外目标位置观测矩阵; $\Delta q_{t,x}, \Delta q_{t,y}$ 分别是 $t$ 时刻超宽带AOA估计的位置横坐标误差、纵坐标误差。

#### 1.3.3 补充定位误差

结合变电站室内外目标定位时的状态方程、观测方程,由卡尔曼滤波器执行数据融合,以误差补偿的方式,补偿两种定位方法的定位误差,完成室内外无缝组合定位。具体方法如下:

(1) 构建变电站室内外目标位置状态矩阵 $\bar{W}_{t+1|t}$ 、定位误差协方差矩阵 $Q_{t+1|t}$ :

$$\bar{W}_{t+1|t} = G W_t \quad (11)$$

$$Q_{t+1|t} = G W_t G^T + P_t \quad (12)$$

式中, $P_t$ 是噪声协方差矩阵。

(2) 运算卡尔曼增益:

$$U_{t+1} = Q_{t+1|t} K^T (G Q_{t+1|t} K^T + P_t) \quad (13)$$

(3) 使用卡尔曼增益,补偿定位误差,更新 $t+1$ 时刻变电站室内外目标定位结果:

$$\bar{W}_{t+1} = \bar{W}_{t+1|t} + U_{t+1} (L_{t+1} - K \bar{W}_{t+1|t}) \quad (14)$$

将多源定位信息融合、卡尔曼滤波器估计和补偿的结果进行组合,实现变电站室内外无缝组合定位。

## 2 实验分析

### 2.1 实验环境设计

为测试本文方法在变电站室内外定位工作中的应用性能,将本文方法使用于某变电站定位系统中,此系统使用的三轴加速度计参数信息如表1所示,三轴陀螺仪参数信息如表2所示。

表1 三轴加速度计参数信息

参数类型	参数取值
供电电源	5 V,25 V
灵敏度	400 mv/g
频率区间	[0 Hz,500 Hz]
防水性	≥100 m水深
使用温度	[-25℃,65℃]

表2 三轴陀螺仪参数信息

参数类型	参数取值
测量范围	±2 500°/sec
灵敏度	14.4 LSBsper°/sec
尺寸	4.0 mm× 4.0 mm× 1.0 mm

### 2.2 静态定位

测试本文方法使用在变电站定位系统后,当变电站室内外存在5个作业人员时,作业人员位置保持不动,使用本文方法对其进行定位,变电站静态目标定位结果如表3所示。

表3 本文方法对变电站静态目标定位结果

工作人员编码	实际位置/m	本文方法定位结果/m	定位误差/m
1	(0.65,0.65)	(0.649,0.649)	0.001
2	(0.65,0.82)	(0.649,0.819)	0.001
3	(0.38,0.23)	(0.379,0.229)	0.001
4	(5.45,0.65)	(5.449,0.649)	0.001
5	(1.85,0.65)	(1.849,0.649)	0.001

如表3所示,本文方法使用在变电站定位系统后,对变电站室内外5个作业人员的静态定位结果精度较高,定位结果与实际位置对比,仅存在0.001 m定位误差,原因是本文方法能够以多源信息融合的方式,补偿航迹推测PDR定位结果、超宽带AOA定位结果之间偏差值,提高变电站室内外静态目标定位精度。

为分析本文方法在静态定位任务中的可用性,统计本文方法使用前后,变电站定位系统对5个作业人员多次静态定位结果的偏差值,对其进行整理后绘制为定位误差散点图,详情如图5、图6所示。

结合图5、图6静态定位误差散点图可知,本文方法可提高变电站定位系统,对室内外静态目标的定位精度,误差散点图中圆圈的直径是0.001 m,本文方法使用前,室内外静态目标的定位误差超出圆圈范围,说明定位误差大于0.001 m;本文方法使用后定位误差处于圆圈内,说

明室内外静态目标的定位误差不大于0.001 m。由此证实,本文方法在变电站室内外目标的静态定位任务中具有可用性。

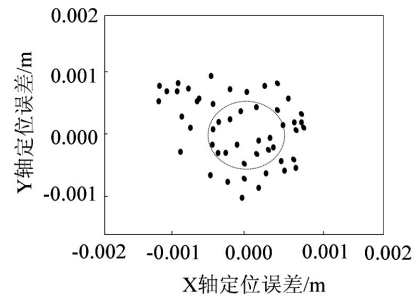


图5 本文方法使用前静态定位误差散点图

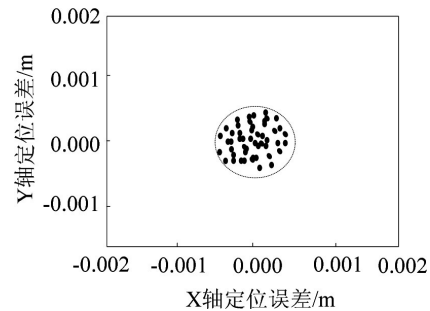


图6 本文方法使用后静态定位误差散点图

### 2.3 动态定位

使用本文方法对变电站某作业人员进行定位,此作业人员在变电站的室内室外区域中,均存在动态移动性,随着作业人员的移动,其位置信息也出现变化,则分别使用航迹推测PDR定位方法、超宽带AOA定位方法、本文提出的无缝组合定位方法对其进行定位,定位后的轨迹如图7、图8、图9所示。

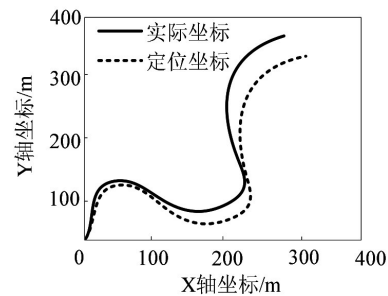


图7 航迹推测PDR定位方法的定位轨迹

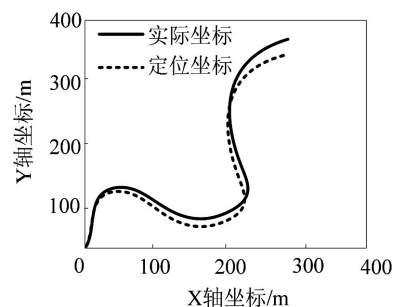


图8 超宽带AOA定位方法的定位轨迹

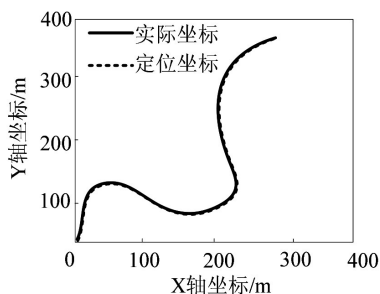


图9 本文方法定位轨迹

对比图7、图8、图9可知,仅使用航迹推测PDR定位方法进行变电站室内外动态目标定位时,若加速度计、陀螺仪对目标运动数据的采集精度不够,便会导致目标定位误差变大;仅使用超宽带AOA定位方法进行变电站室内外目标定位时,若UWB信号存在噪声未被有效处理,也会导致目标精度受到影响,致使定位轨迹与实际不符;而本文提出的无缝组合定位方法相比之下,目标定位精度显著,原因是本文方法采用卡尔曼滤波器,将航迹推测PDR定位结果、超宽带AOA定位结果之间的误差,使用卡尔曼增益,完成定位误差补偿,从而实现变电站室内外无缝组合式精准定位。

表4是变电站室内外环境中,不同作业人员运行轨迹工况中,本文方法使用前,目标定位误差对比结果。

表4 本文方法对变电站动态目标的定位效果

运行轨迹类型	室内定位误差/m		室外定位误差/m	
	使用前	使用后	使用前	使用后
矩形	0.231	0.001	0.324	0.001
I形	0.234	0.001	0.453	0.001
U形	0.324	0.001	0.342	0.001
圆形	0.092	0.001	0.324	0.001
T字形	0.014	0.001	0.532	0.001
L形	0.013	0.001	0.234	0.001

分析表4数据可知,本文方法使用前,变电站室内外环境中,随着作业人员运行轨迹的变化,定位误差也随之变化;本文方法使用后,不论是变电站室内还是室外,作业人员多种运行轨迹的定位误差都为0.001 m,定位精度较高。这是因为本文引用了卡尔曼增益对定位误差进行补偿,提高了定位准确率。

### 3 结束语

本文提出基于超宽带AOA估计和多源信息融合的变电站室内外无缝组合定位方法,此方法有效利用卡尔曼滤波器,补偿航迹推测PDR定位方法、超宽带AOA定位方法对目标定位结果之间的对比误差,从而实现变电站室内外无缝组合定位,提高了变电站室内外静态目标、动态目标的定位精度。但因篇幅原因,虽然考虑了加速度计、陀螺仪、超宽带信号的抗扰性较差问题,但未对去

噪问题进行深入研究,在后续的研究工作中,会在卡尔曼滤波器应用之前,对加速度计、陀螺仪、超宽带信号进行预处理,进一步优化本文方法的定位精度。

### 参考文献:

- [1] 周振南, 胡洪. GPS/UWB室内外无缝定位随机模型研究[J]. 测绘通报, 2021(S2): 112-115.
- [2] 姚子扬, 尚俊娜, 孙建强, 等. 一种多源融合室内外无缝定位方法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(1): 72-83.
- [3] 邹俊平, 王解先. 单双频GPS混合观测高精度单频精密单点定位[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 731-736.
- [4] 曹鸿基, 汪云甲, 毕京学. 一种基于蓝牙/Wi-Fi的自适应指纹定位方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(2): 16-21.
- [5] 王思远, 王坚, 韩厚增. 城市环境下附有约束条件的室内外协同定位模型[J]. 测绘科学, 2022, 47(6): 21-29.
- [6] 李芬芳, 汝春瑞, 党小超, 等. 基于CSI和加权混合回归的室内定位方法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(5): 667-675.
- [7] 吴海欣, 文梓豪, 熊弘俊, 等. 基于激光雷达的有界区域快速全局定位算法[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 428-434.
- [8] 刘坤, 吴建新, 甄杰, 等. 基于阵列天线和稀疏贝叶斯学习的室内定位方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(5): 1158-1164.
- [9] 钱伟, 陈析, 陈鑫, 等. 基于里程计/LiDAR/GNSS的室内外连续定位方法研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(4): 523-529.
- [10] 张鹏, 王树森, 李孟委. SINS/GPS/PDR室内外无缝导航定位算法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 113-119.
- [11] 李晨辉, 甄杰, 祝会忠, 等. 复杂环境下的超宽带高精度定位算法[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 4-10.
- [12] 李帅鑫, 李广云, 王力, 等. LiDAR/IMU紧耦合的实时定位方法[J]. 自动化学报, 2021, 47(6): 1377-1389.
- [13] 黄凤英, 夏靖波. 超高频RFID不同信号特征参数的室内定位方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 39-46.
- [14] 缪颖, 朱正伟, 诸燕平. 基于距离和属性加权的FWKNN室内定位方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 450-455.
- [15] 赵增华, 童跃凡, 崔佳洋. 基于域自适应的Wi-Fi指纹设备无关室内定位模型[J]. 通信学报, 2022, 43(4): 143-153.

作者简介:周航帆(1979—),男,硕士,高级工程师,研究方向:无线网络。