

# 基于超宽带技术的多区域定位系统设计

陈雷, 王夏阳

(珠海优特电力科技股份有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 近年来, 超宽带定位技术的快速发展, 基于超带宽的定位系统被广泛应用于工业生产管控系统中; 由于无线定位系统覆盖范围大、涉及场景多, 所以需要根据工程实际情况将系统划分为多个定位区域, 每个定位区域内分别完成定位, 最后由系统完成区域结果的仲裁和切换; 如果区域切换处理不当, 会影响整个定位系统的性能效果, 制约了无线定位系统的进一步推广; 针对基于超宽带技术的多区域定位系统中的这个问题, 设计了一种区域切换方法及相关流程, 实现了区域切换的有效性、准确性以及实时性, 并在实际的工程项目中进行了实测, 测试结果顺利通过工程验证(定位频率为 5 Hz, “切入”次数门限值为 2, “切出”次数门限值为 -2), 满足工程需求, 为多区域定位系统的设计提供了有效手段。

**关键词:** 无线定位技术; 超宽带技术; 多区域定位系统; 区域切换; 定位精度

## Design of Multi-area Wireless Locating Systems Based on the UWB Technique

CHEN Lei, WANG Xiayang

(Zhuhai Unitech Power Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** In recent years, with the rapid development of the Ultra Wide Band (UWB) locating technique, the UWB locating systems are widely applied in industrial production control systems. Consequently, due to the covering large range and many scenes of wireless locating systems, it is necessary to divide the system into the multiple positioning areas according to the actual engineering situation. Each positioning area is separately carried out, finally, the system arbitrates and switches the regional results. If the area switching was handled improperly, it would affect the performance of the whole locating system and restrict its further promotion. Aiming at this problem, based on the UWB multi-area locating system, an area switching scheme is proposed, which realizes the effectiveness, accuracy and instantaneity of the scheme, by the practical engineering project test, the test result is verified by the engineer project (5Hz of location frequency, 2 of switch-in counting threshold, and -2 of switch-out counting threshold), which meets the engineering requirements, and It provides an effective method for the regional positioning system design.

**Keywords:** wireless locating systems; UWB; multi-area locating systems; area switching; locating accuracy

## 0 引言

“中国制造 2025”的提出和推进, 引领了智能制造产业的蓬勃发展, 其中, 基于位置信息的定位服务, 作为工业管控自动化领域中的重要一环, 也越发广泛地被推广和应用<sup>[1-3]</sup>。无线定位技术, 作为定位技术中最重要的一个技术领域, 由于其定位精度高、工程部署简单、成本低廉, 已经越来越得到工业界和学术界的重视<sup>[4]</sup>。

近年来, 无线通信技术不断突破技术瓶颈, 为无线定位技术的进步奠定了坚实的基础; 其中, 卫星定位技术<sup>[5-7]</sup>、无线传感网络定位技术<sup>[8-12]</sup>、以及蓝牙定位技术<sup>[13-14]</sup>发展快速, 定位性能大幅提升, 扩展了无线定位技术的应用场景。然而, 上述基于无线载波技术的无线定位技术, 信号在传播过程中会被建筑或者大型设备遮挡, 影响定位精度, 所以无法满足复杂环境下的高精度定位需求,

限制了无线定位技术在高精度场景下的应用<sup>[15-16]</sup>。

超宽带 (UWB, ultra wide band) 定位技术作为无线定位技术的生力军, 利用纳秒级的非正弦波窄脉冲传输数据, 属于无载波通信技术, 具有分辨率高、抗多径干扰能力强、功耗与复杂度低的特点, 越发得到业界学者和相关厂商的关注<sup>[17-18]</sup>。UWB 技术将测量距离的误差降低为厘米级, 为位置信息的解算提供了高精度数据源, 从根本上提高了无线定位系统的定位精度<sup>[19-23]</sup>。所以, UWB 定位技术已经成为高精度定位领域内最闪耀的新星<sup>[24]</sup>。

UWB 定位技术的出现和不断革新, 使得无线定位技术逐渐满足了工业界对精准位置信息服务的需求, 应用于变电站、轨道交通、矿井等各种安全生产监控系统中<sup>[25-26]</sup>。随着定位场景的不断扩展, 使用单一定位区域已经不再能够满足定位系统的要求, 例如: 室内室外定位环境具有较

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-07-18。

作者简介: 陈雷 (1977-), 男, 内蒙古赤峰市人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护和自动控制技术方向的研究。

通讯作者: 王夏阳 (1988-), 男, 四川双流县人, 博士研究生, 主要从事物联网无线通信技术方向的研究。

引用格式: 陈雷, 王夏阳. 基于超宽带技术的多区域定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 268-276.

明显的差异, 需要分别进行定位, 以提高定位精度<sup>[27-29]</sup>; 在大面积和复杂环境中, 分区域定位可以降低非视距传输的影响, 并解决基站远距离无线同步困难的问题<sup>[30-32]</sup>。但是, 在各个区域交界处, 受到定位精度以及区域切换算法的影响, 定位系统容易出现切换失败 (应该切换而未触发切换)、切换错误 (不应该切换而触发切换)、切换乒乓 (在同一位置反复触发切换) 以及切换时延过长等现象, 降低了整体性能效果, 影响了定位系统在实际工程中的应用<sup>[33]</sup>。

针对这一核心问题, 本文提出了一种区域切换的方法及流程, 并将之应用于基于超宽带技术的多区域定位系统中。经过工程现场实测验证, 该方法能够有效实现区域切换, 切换时延约在 1 s 左右; 而且通过使用多区域定位场景, 提高了系统的整体定位精度, 满足工程实际对位置服务精度和时延的要求, 为无线定位技术的推广提供了重要的技术保障。

在本文以下章节中, 章节 1 介绍了基于 UWB 定位技术的多区域定位系统的典型架构和基本原理; 章节 2 提出了区域切换的具体算法及相关流程; 章节 3 描述了工程现场的测试环境与相关参数, 然后展示并分析了测试结果; 最终, 在章节 4 总结全文。

## 1 多区域定位系统结构及原理

典型的多区域定位系统架构如图 1 所示, 由定位标签、定位基站、以及定位服务器组成, 其中, 定位服务器内有对应于每个定位区域的区域定位器以及区域选择器<sup>[34]</sup>。

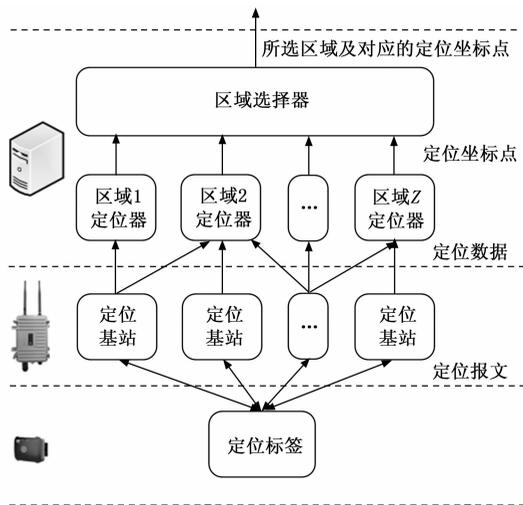


图 1 多区域定位系统框架及定位过程图示

### 1.1 定位标签

定位标签使用 UWB 通信模组, 周期性地与定位基站进行通信, 将每条通信报文的发送时刻、接收时刻以及该标签的唯一标识码传输给定位基站。

### 1.2 定位基站

定位基站使用 UWB 通信模组, 接收并响应定位标签的

定位请求, 根据报文中的内容形成定位数据, 通过以太网或者 Wi-Fi 发给定位服务器中对应的区域定位器中。对于多区域的定位系统, 每个区域内都要部署定位基站; 当定位基站部署于多个定位区域的交叉地带时, 该定位基站的定位数据需要传输给定位服务器中对应的每个区域定位器, 以参与该区域内的定位坐标点的求解过程。

此外, 在定位基站之中选择一个作为基准基站, 通过时钟同步原理<sup>[35]</sup>, 将定位区域内其他定位基站的时间与基准基站的时间保持同步。

### 1.3 定位服务器

定位服务器负责利用定位数据完成位置的解算。在多区域的定位系统中, 定位服务器由一系列区域定位器和一个区域选择器组成。其中, 每个定位区域对应一个区域定位器, 利用区域内定位基站传输的定位数据, 求解得到定位标签在该区域内的定位坐标点; 每个区域定位器将定位坐标点传输给区域选择器, 由区域选择器利用相关算法做出仲裁, 选出区域选择的结果 (所选区域及对应的定位坐标点)。

本文的关注点是多区域定位系统中区域选择的算法, 其核心问题是要解决定位标签运动过程中, 区域选择器中定位预期的切换问题, 如图 2 所示, 当定位标签从定位区域 1 运动到区域 2 时, 区域选择器需要相应地从选择区域 1 的定位坐标点切换到选择区域 2 的定位坐标点。既要保证该过程的准确性与实时性, 也要防止选择结果出现切换乒乓的现象。相关算法在下一章节中进行详细阐述。

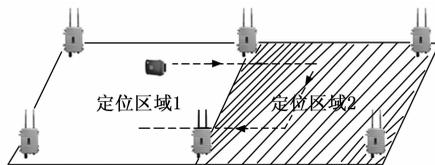


图 2 区域切换示意图

## 2 系统软件设计

在定位服务器内, 每个定位区域对应的定位器完成该区域内定位坐标点的计算, 然后将该区域内的定位坐标点输入给区域选择器, 由区域选择器判断是否触发切换、并仲裁区域选择的结果 (结果内容含有所选的区域及该区域对应的定位坐标点)。区域选择器的工作流程如图 3 所示。

步骤 1: 计算每个区域的特征值, 包括基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  和边界特征值集合  $\lambda_B = \{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$ 。对于一个区域, 该特征值只需在配置区域信息时计算一次, 并用于区域选择。具体计算过程在章节 2.1 中详述。

步骤 2: 输入每个定位区域定位器计算所得的定位坐标点, 对这些定位坐标点进行区域选择仲裁。

步骤 3: 判断每个定位区域的定位坐标点是否在该区域的边界范围内, 并以此计算边界权重  $\omega_j$  的值。具体过程在章节 2.2 中详述。

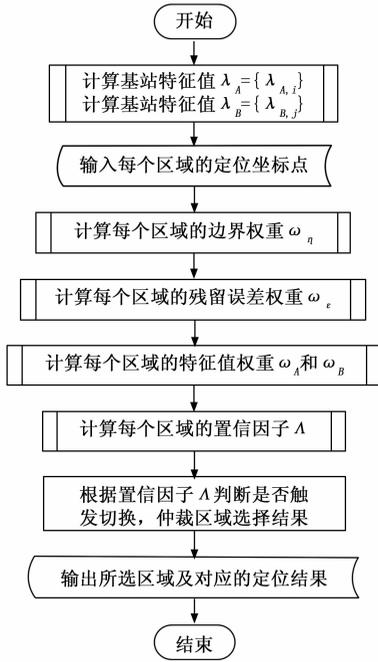


图 3 区域选择器的工作流程图示

$\{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$ 。

特征值集合的计算过程中涉及到将区域划分为格子, 并求得格子中心到每个基站的距离信息、以及格子中心到每个边界上的点的距离信息, 如图 4 所示。其中, 浅色虚线将区域划分为大小相等的格子, 点  $P$  为其中某一个格子的中心点 (图中 “·” 标识); 区域边界附近共部署 6 个基站 (图中 “×” 标识), 基站位置为  $A_i, i = 1 \sim 6$ ; 区域有 4 条边界  $B_j, j = 1 \sim 4$ , 边界上的点为  $\{P_{B,j} \in B_j\}, j = 1 \sim 4$ 。所以, 点  $P$  到各个基站的距离为  $\|PA_i\|, i = 1 \sim 6$ , 点  $P$  到各个边界上的点的距离为  $\|PP_{B,j}\|, j = 1 \sim 4$ 。

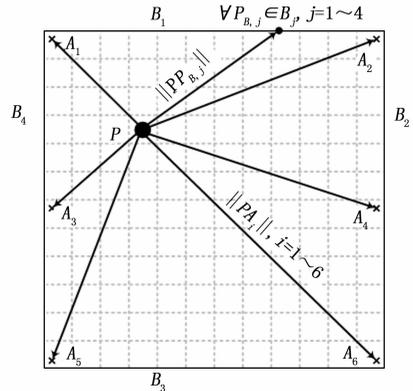


图 4 区域内格子划分与点位距离示意图

步骤 4: 利用每个区域定位器的坐标点结果, 计算每个区域的残留误差权重  $\omega_\epsilon$  的值。具体过程在章节 2.3 中详述。

步骤 5: 根据每个区域的定位坐标点与特征值, 计算基站特征值权重  $\omega_A$  和边界特征值权重  $\omega_B$  的值。具体过程在章节 2.4 中详述。

步骤 6: 综合考虑 “步骤 4~6” 的所有权重值, 计算置信因子  $\Delta$  的值, 具体计算过程在章节 2.5 中详述。

步骤 7: 根据每个区域内的置信因子的值, 判断是否触发切换条件, 并仲裁区域选择的最终结果。具体过程在章节 2.6 中详述。

步骤 8: 输出所选区域及该区域对应的定位结果。

通过以上步骤, 可以计算得到区域选择的最终结果。每一步的具体过程在该章节的下文中进行详述。

### 2.1 计算定位区域的特征值

在定位服务器内, 输入每个定位区域的切换信息, 包括:

- 1) 本区域的区域编号: 每个区域在服务器内的唯一标识, 用于区分不同区域;
- 2) 可切换区域的区域编号: 该区域可以切换到的目标区域的区域编号;
- 3) 区域边界数量  $M$  与每条区域边界: 每个边界可以定义为一段由一系列的点的集合组成的线, 每条线记为  $B_j, j = 1 \sim M$ , 这些线首尾相接, 构成整个区域的边界;
- 4) 边界附近的基站数量  $N$  与边界附近的基站坐标  $A_i, i = 1 \sim N$ 。

利用这些区域信息, 计算得到每个区域对应的基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  和边界特征值集合  $\lambda_B =$

特别地, 点  $P$  到边界  $B_j$  上所有点  $\{P_{B,j} \in B_j\}$  的距离的最小值  $l_{B,j}$  可以表示为:

$$l_{B,j} = \min\{\|PP_{B,j}\|, \forall P_{B,j} \in B_j, j = 1 \sim M\} \quad (1)$$

其求解方法如图 5 所示:

- 1) 如果点  $P$  在边界  $B_j$  上, 则距离为 0。
- 2) 如果在边界外, 从点  $P$  做边界  $B_j$  的垂线, 当垂线的交点在边界  $B_j$  上时, 则垂线距离即为  $l_{B,j}$ ;
- 3) 如果在边界外, 从点  $P$  做边界  $B_j$  的垂线, 当垂线的交点在边界  $B_j$  外时, 求得点  $P$  到边界  $B_j$  的两个端点的距离中较小的一个, 即为  $l_{B,j}$ 。

定位区域特征值计算过程如图 6 所示, 将定位区域以一定的粒度划分成大小相等的格子, 遍历所有格子中心, 求得基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  和边界特征值集合  $\lambda_B = \{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$ 。计算过程可以表述为:

步骤 1: 计算格子中心点  $P$  到每个基站  $i$  的欧式距离  $l_{A,i}$ :

$$l_{A,i} = \|PA_i\|, i = 1 \sim N \quad (2)$$

其中:  $\|\cdot\|$  表示求解欧式距离;

步骤 2: 找到  $\{l_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  中的最小值及对应的基站  $I$ :

$$l_{A,I} = \min\{l_{A,i}, i = 1 \sim N\} \quad (3)$$

步骤 3: 从该定位区域的基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  中找到基站  $I$  对应的值  $\lambda_{A,I}$ , 并更新:

$$\lambda_{A,I} = \max\{\lambda_{A,I}, l_{A,I}\} \quad (4)$$

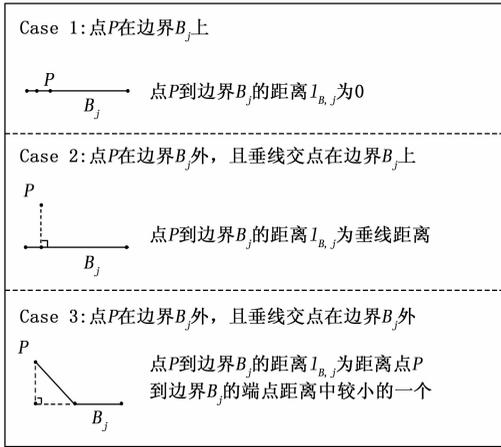


图 5 点到边界的距离求解示意图

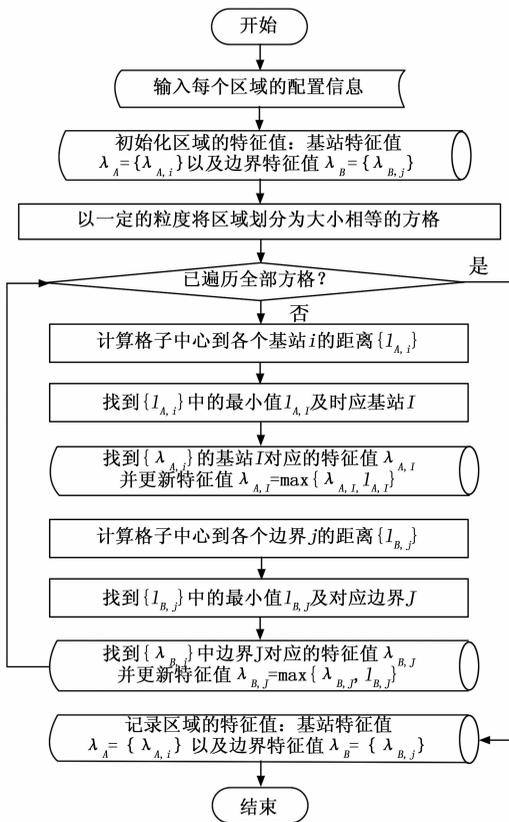


图 6 区域特征值求解过程图

步骤 4: 计算格子中心点  $P$  到每个边界  $j$  的距离  $l_{B,j}$ , 即, 中心点  $P$  到边界  $B_j$  上所有点  $\{P_{B,j} \in B_j\}$  的距离的最小值  $l_{B,j}$ ;

步骤 5: 找到  $\{l_{B,j}, j = 1 \sim M\}$  中的最小值及对应的边界  $J$ :

$$l_{B,J} = \min \{l_{B,j}, j = 1 \sim M\} \quad (5)$$

步骤 6: 从该定位区域的边界特征值集合  $\lambda_B = \{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$  中找到边界  $J$  对应的值  $\lambda_{B,J}$ , 并更新:

$$\lambda_{B,J} = \max \{\lambda_{B,j}, l_{B,j}\} \quad (6)$$

步骤 7: 遍历区域内的所有格子, 重复“步骤 1~6”, 更新该区域的基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  和边界特征值集合  $\lambda_B = \{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$ 。

通过以上步骤, 可以计算得到每个区域的基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  和边界特征值集合  $\lambda_B = \{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$ 。

## 2.2 判断定位结果是否在区域边界内, 并获得边界权重值 $\omega_j$

对于每个定位区域, 需要判断定位结果是否在区域边界范围内, 判断方法为射线法, 如图 7 所示, 从定位结果点  $P_0$  引一条射线  $P_0Q$ , 根据射线  $P_0Q$  与边界的有效交点个数 (记为  $f$ ) 判断点  $P_0$  是否在边界内: 当有效交点个数为奇数时, 判断点  $P_0$  在边界范围内; 否则, 判断点  $P_0$  在边界范围外。其中, 有效交点是指射线与边界存在交点, 且该交点不是边界的两个顶点中较低的顶点。

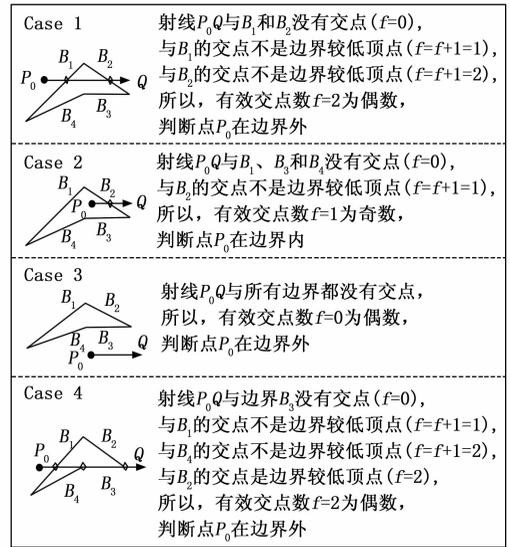


图 7 射线法判断点位是否在边界内的示意图

判断过程如图 8 所示, 可以表述为:

步骤 1: 过定位结果坐标点  $P_0$ 、沿  $X$  轴正方向做一条平行于  $X$  轴的射线 (记为  $P_0Q$ ), 并初始化有效交点个数  $f = 0$ ;

步骤 2: 求解射线  $P_0Q$  与边界  $B_j (j = 1 \sim M)$  的交点: 如果射线  $P_0Q$  与边界  $B_j$  平行或重合, 则认为不存在交点, 进入“步骤 4”; 否则, 求解射线  $P_0Q$  与边界  $B_j$  的交点, 并进入“步骤 3”;

步骤 3: 如果射线  $P_0Q$  与边界  $B_j (j = 1 \sim M)$  的交点与边界  $B_j$  较低的顶点不同, 则认为该交点为有效交点, 并更新有效交点个数  $f = f + 1$ ; 否则, 认为该交点为无效交点, 有效交点个数  $f$  不发生变化;

步骤 4: 遍历区域的所有边界  $B_j (j = 1 \sim M)$ , 重复“步骤 2~3”, 更新有效交点个数  $f$ ;

步骤 5: 根据  $f$  的值, 判断坐标点是否在边界区域内,

并以此给定边界权重  $\omega_\eta$  的值:

$$\omega_\eta = \begin{cases} 1, & \text{如果 } f \text{ 为奇数, 即点在边界内} \\ -1, & \text{如果 } f \text{ 为偶数, 即点在边界外} \end{cases} \quad (7)$$

通过以上步骤, 可以分别判断每个定位区域内的定位结果坐标点是否在对应的定位区域边界范围内, 并相应的更新边界权重  $\omega_\eta$  的值: 当定位结果坐标点在区域边界范围内时, 权重值  $\omega_\eta = 1$ ; 否则, 权重值  $\omega_\eta = -1$ 。

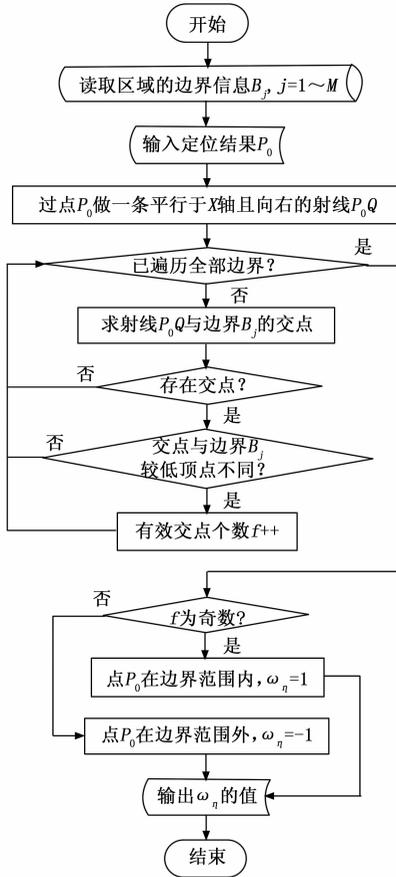


图 8 判断定位结果是否在边界内的流程图示

### 2.3 计算每个区域定位坐标点的残差权重 $\omega_\epsilon$

在一个定位区域内, 一共部署了  $K$  个定位基站, 坐标分别为  $P_k, k = 1 \sim K$ ; 并选择其中一个作为基准基站(其坐标为  $P_1$ ), 主要负责为其他基站提供同步信号, 以保证全部的基站都实现时钟同步。每个定位基站  $k$  都对应一个定位数据记为  $\mu_k, k = 1 \sim K$ 。当使用飞行时间 (ToF, time of flight) 定位手段时, 定位数据  $\mu_k$  为定位标签与该基站之间的距离; 当使用到达时间差 (TDOA, time difference of arrival) 定位手段时, 定位数据  $\mu_k$  为定位标签到该基站的距离减去定位标签到基准基站的距离的差值。

在这个区域内, 利用该区域的定位数据集合  $\{\mu_k, k = 1 \sim K\}$  计算得到该区域的定位结果  $P_0$ , 进而计算得到对应于数据组合的估算数据集合  $\{\hat{\mu}_k, k = 1 \sim K\}$ 。其中, 对于 ToF 定位手段, 估算数据集合中的元素  $\hat{\mu}_k$  为定位结果  $P_0$  与定位基站  $k$  的距离, 其表达式可以写作:

$$\hat{\mu}_k = \|P_0 P_k\|, k = 1 \sim K \quad (8)$$

对于 TDoA 定位手段, 估算数据集合中的元素  $\hat{\mu}_k$  为定位结果  $P_0$  与定位基站  $k$  的距离减去定位结果与基准基站的距离的差值, 其表达式可以写作:

$$\hat{\mu}_k = \|P_0 P_k\| - \|P_0 P_1\|, k = 1 \sim K \quad (9)$$

计算估算数据集合  $\{\hat{\mu}_k, k = 1 \sim K\}$  与定位数据集合  $\{\mu_k, k = 1 \sim K\}$  的残留误差  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \sum_{k=2}^K \sqrt{\frac{(\mu_k - \hat{\mu}_k)^2}{(K-1)}} \quad (10)$$

进而计算得到残差权重值  $\omega_\epsilon$ :

$$\omega_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \quad (11)$$

所以, 残差权重表达式 (11) 可以理解为: 当定位精度越高时, 定位结果坐标点的残差  $\epsilon$  值越小, 其权重值  $\omega_\epsilon$  越大。

### 2.4 计算区域特征值权重 $\omega_A$ 和 $\omega_B$

计算定位结果  $P_0$  到各个边界附近的基站  $A_i, i = 1 \sim N$  的距离  $d_{A,i}$ :

$$d_{A,i} = \|P_0 A_i\|, i = 1 \sim N \quad (12)$$

找到集合中  $\{d_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  的最小值  $d_{A,I}$  及对应的基站  $I$ :

$$d_{A,I} = \min\{d_{A,i}, i = 1 \sim N\} \quad (13)$$

根据基站  $I$ , 在章节 2.1 求得的基站特征值集合  $\lambda_A = \{\lambda_{A,i}, i = 1 \sim N\}$  中, 找到基站  $I$  对应的基站特征值  $\lambda_{A,I}$ , 进而计算得到该区域的基站特征值的权重  $\omega_A$ :

$$\omega_A = \frac{d_{A,I}}{\lambda_{A,I}} \quad (14)$$

计算定位结果  $P_0$  到各个边界  $B_j$  的距离  $d_{B,j}$ :

$$d_{B,j} = \min\{\|P_0 P_{B,j}\|, \forall P_{B,j} \in B_j\}, j = 1 \sim M \quad (15)$$

找到集合中  $\{d_{B,j}, j = 1 \sim M\}$  的最小值  $d_{B,J}$  及对应的边界  $J$ :

$$d_{B,J} = \min\{d_{B,j}, j = 1 \sim M\} \quad (16)$$

根据边界  $J$ , 在章节 2.1 求得的边界特征值集合  $\lambda_B = \{\lambda_{B,j}, j = 1 \sim M\}$  中, 找到边界  $J$  对应的边界特征值  $\lambda_{B,J}$ , 进而计算得到该区域的边界特征值权重  $\omega_B$ :

$$\omega_B = \frac{d_{B,J}}{\lambda_{B,J}} \quad (17)$$

所以, 特征值权重表达式 (14) 和 (17) 可以理解为: 当定位结果坐标点距离边界越远时, 其特征值权重  $\omega_A$  和  $\omega_B$  的取值越大。

### 2.5 计算该区域的置信因子 $\Lambda$

综合表达式 (7)、(11)、(14) 和 (17), 计算该区域的置信因子  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \omega_\eta(\omega_A + \omega_B) + \omega_\epsilon \quad (18)$$

特别地, 当定位区域内不存在定位结果时, 置信因子  $\Lambda = -\infty$ , 意味着定位系统不会触发切换进入一个不存在定位结果的区域。

表达式 (18) 可以理解为:

1) 当定位结果在本区域内时  $\omega_y = 1$ , 如果定位结果坐标点离边界越远, 特征值权重值  $\omega_A$  和  $\omega_B$  越大, 导致其置信因子  $\Delta$  较大, 所以不容易切换离开本区域; 当定位结果在本区域外时  $\omega_y = -1$ , 如果定位结果坐标点离边界越远, 特征值权重值  $\omega_A$  和  $\omega_B$  越大, 导致置信因子  $\Delta$  越小, 所以不容易切换进入本区域。

2) 当定位结果在本区域内时, 其定位结果的残留误差较小, 残差权重值  $\omega_e$  较大; 当离开本区域时, 其定位结果的残留误差较大, 残差权重值  $\omega_e$  较小。所以, 当离开定位区域时, 其置信因子  $\Delta$  的取值更小, 更容易判定切换离开当前区域。

### 2.6 判断是否发生切换, 仲裁区域选择结果

每个区域都对应有一个区域选择计数器  $\delta$ , 用于辅助判断是否发生区域切换。对于服务器中的  $Z$  个定位区域, 根据每个区域对应的置信因子  $\Delta_z, z = 1 \sim Z$  更新该区域对应的计数器  $\delta_z, z = 1 \sim Z$  的值, 并利用计数器判断是否发生切换。该流程如图 9 所示。

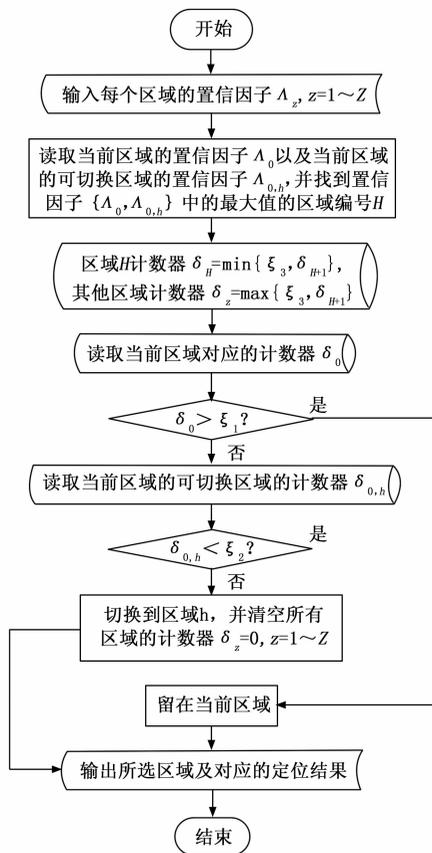


图 9 更新计数器并判断是否切换的流程图示

步骤 1: 读取当前区域的置信因子  $\Delta_0$  以及当前区域的可切换区域的置信因子  $\Delta_{0,h}$ , 并找到置信因子  $\{\Delta_0, \Delta_{0,h}\}$  中的最大值的区域编号  $H$ ;

步骤 2: 更新计数器  $\delta_z$  的值:

$$\delta_z = \begin{cases} \max\{\xi_1, \delta_z - 1\}, & \forall z \neq H \\ \min\{\xi_2, \delta_z + 1\}, & z = H \end{cases} \quad (19)$$

即, 编号为  $H$  的区域的计数器的值累加一, 其他区域的计数器的值递减一。每个计数器的值的取值范围为  $[\xi_1, \xi_2]$ , 即, 当计数器的值达到  $\xi_1$  时不再减少, 当计数器的值达到  $\xi_2$  时不再增加。其中,  $\xi_1$  代表“切出”门限, 当计数器减少到  $\delta = \xi_1$  时, 表示本次定位结果已经准备离开该区域;  $\xi_2$  代表“切入”门限, 当计数器增加到  $\delta = \xi_2$  时, 表示本次定位结果已经准备进入该区域。 $\xi_1$  和  $\xi_2$  取值的设计会影响到切换成功率和切换时延, 相关内容将在章节 3 中进行详细描述。

步骤 3: 读取当前区域对应的计数器  $\delta_0$ ;

步骤 4: 如果  $\delta_0 > \xi_1$ , 则说明本次定位结果还未离开当前区域, 此时不发生切换, 仍留在当前区域, 区域选择结果为当前区域, 并进入“步骤 7”; 否则, 说明本次定位结果已经准备离开当前区域, 需要进入“步骤 5”, 以判断是否进入当前区域的可切换区域。

步骤 5: 读取当前区域的可切换区域的计数器  $\delta_{0,h}$ ;

步骤 6: 如果  $\delta_{0,h} < \xi_2$ , 则说明定位结果未准备进入当前区域的可切换区域, 即, 此时不发生切换, 仍留在当前区域, 区域选择结果为当前区域, 并进入“步骤 7”; 否则, 说明发送定位区域切换, 切换到对应的区域, 区域选择结果为当前区域对应的可切换区域, 并将所有的计数器清零, 然后进入“步骤 7”;

步骤 7: 输出所选择的区域以及该区域对应的定位结果。

综上所述, 该章节详细介绍了区域选择器在进行区域选择(定位区域切换)时的算法流程。通过计算每个区域的置信因子  $\Delta$  来更新每个定位区域的区域选择计数器  $\delta$ , 进而判断是否发生了区域切换, 以仲裁区域选择的结果(所选区域及对应的定位坐标点)。

这种区域选择的流程, 综合考虑了定位结果与区域边界范围、区域特征值以及定位残留误差的关系, 并通过使用区域选择计数器来防止切换乒乓的现象, 从原理上保证了区域切换的准确性和实时性。对该算法流程的无线定位系统进行了工程测试, 相关内容在下一个章节中进行描述。

## 3 实验结果与分析

为了验证该算法的有效性, 在浙江省某变电站内部署了一套应用该算法的 UWB 无线定位系统, 覆盖了约 60 米  $\times$  70 米的室外场地, 概况如图 10 所示。

如图 10 所示, 室外场地存在两座大型变压器、一座主控楼以及一些龙门架、电抗器、机器人坞等建筑, 图中“ $\times$ ”标识的位置部署了定位基站。其中, 主控楼内没有定位基站, 不做定位需求; 楼内有工具间、二次设备间和配电装置间, 工具间在楼前有一扇门(门 A)可供进出, 二

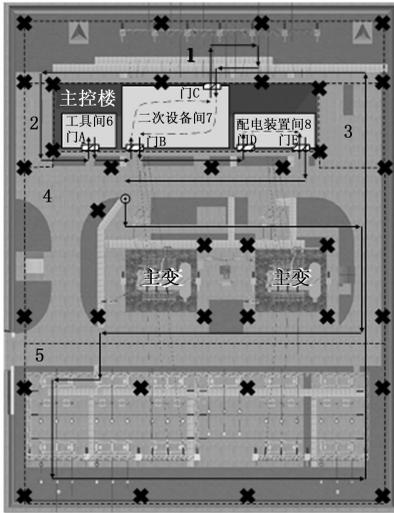


图 10 变电站场地示意图

次设备间在楼前和楼后各有一扇门（楼前和楼后分别对应门 B 和门 C）可供进出，配电装置间在楼前有两扇门（靠近二测设备间的门为门 D，另外一个门为门 E）可供进出，所有门宽度不超过 1.5 米，在图 10 中用阴影矩形表示。在变电站内，一共划分了 8 个定位区域，区域信息描述如表 1。

表 1 定位区域划分表

定位区域编号	区域描述	可切换区域编号
1	主控楼后 110 kV 区域	2,3,7
2	主控楼左侧通道	1,4
3	主控楼右侧通道	1,4
4	主控楼前及主变区域	2,3,6,7,8
5	220 kV 区域	4
6	工具间	4
7	二次设备间	1,4
8	配电装置间	4

在场地内分别进行室内外进出切换测试和全场切换测试，测试参数详见表 2。室内外进出切换测试是指佩戴有定位标签的工作人员反复进出各个房间（工具间、二次设备间和配电装置间），并观察切换成功率和切换时延。全场切换测试是指佩戴有定位标签的工作人员沿着指定路线（图 10 中用带箭头的实线表示路线及行进方向，区域切换顺序为 4→5→4→3→1→2→4→6→4→7→1→7→4→8→4，共 14 次切换）在场地内行进，观察切换成功率、切换时延以及定位结果与路线测绘值之间的偏差值。

表 2 定位测试参数表格

参数名称	取值
定位频率	5 Hz
“切出”门限 $\xi_1$	-2
“切入”上限 $\xi_2$	2

切换成功率  $\zeta$  的计算表达式为：

$$\zeta = (S_{All} - S_{Fail} - S_{Error}) / S_{All} \cdot 100\% \quad (20)$$

其中： $S_{All}$  表示切换测试的总数， $S_{Fail}$  表示切换失败（应该切换而未触发切换）的次数， $S_{Error}$  表示切换错误（不应该切换而触发切换）的次数。

切换时延是指在成功“切换”的前提下，运动场景实际发生改变的时间与定位结果发生切换的时间的差值，计算表达式为：

$$\Delta\tau = \tau_{switch} - \tau_{acc} \quad (21)$$

其中： $\tau_{switch}$  表示定位结果发生切换的时刻， $\tau_{acc}$  表示实际运动场景改变的时刻。

定位结果与路线测绘值之间的偏差是指定位结果偏离路线的垂直距离  $d_s$  ( $s$  表示第  $s$  次定位)，并使用统计值  $\sigma_{95}$  来表征定位精度，其含义是指 95% 的定位结果偏差值都小于或者等于  $\sigma_{95}$ ，即，如果使用  $\{d_s\}$  表征所有定位结果的偏差值  $d_s$  的集合，则  $\sigma_{95}$  是大于或者等于  $\{d_s\}$  中 95% 的元素值的最小值，可以表示为：

$$\sigma_{95} = \operatorname{argmin}\{d \geq \{d_s\} \text{ 中 } 95\% \text{ 的元素值}\} \quad (22)$$

作为验证对比项，引入[27]中的区域切换算法。在后面的测试结果中，用“新算法”代指本文提出的算法对应的结果，用“[27]算法”代指[27]中算法对应的结果。

### 3.1 室内外进出切换测试

佩戴有定位标签的工作人员，分别在工具间门口（门 A）、二次设备间门口（门 B 和门 C）和配电装置间门口（门 D 和门 E），往返进出 10 次，并在每个区域停留 5 秒，分别测试切换成功率和切换时延。

在门 A 反复进出的切换测试结果如图 11 所示，图中横轴为时间（单位为秒），纵轴为区域编号取值（室外对应区域编号为 4，室内对应区域编号为 6）；带有“·”实线为人员实际所在的区域，带有“×”的长虚线为“新算法”的结果，带有“×”的短虚线为“[27]算法”的结果。通过结果可以发现，本文提出的切换方案可以实现区域的切换，10 次进出（一共 20 次切换）的切换成功率  $\zeta$  为 100%，而“[27]算法”存在两次切换失败。

使用相同的测试方案，针对门 B~E 进行测试，测试结果如表 3 所示。通过统计结果可以发现，“新算法”切换成功率为 100%，切换时延的平均值约在 1 s 左右，其最大值也不超过 1.5 s，基本满足工程需求；而“[27]算法”虽然切换时延与“新算法”基本相同，但是存在一定切换失败的风险，不利于工程推广。

由于当前区域的计数器  $\delta_0$  需要从“切入”上限  $\xi_2$  依次递减到“切出”门限  $\xi_1$ ，而目标区域的计数器  $\delta_{0,h}$  需要从“切出”门限  $\xi_1$  依次累加到“切入”上限  $\xi_2$ 。当测试参数设定为  $\xi_1 = -\xi_2 = -2$  时，如果每次都定位准确，则切换过程需要经过 5 次定位；考虑到测试的定位频率为 5 Hz，所以切换时延的理论值为 1 s。由于存在定位误差的影响，所以

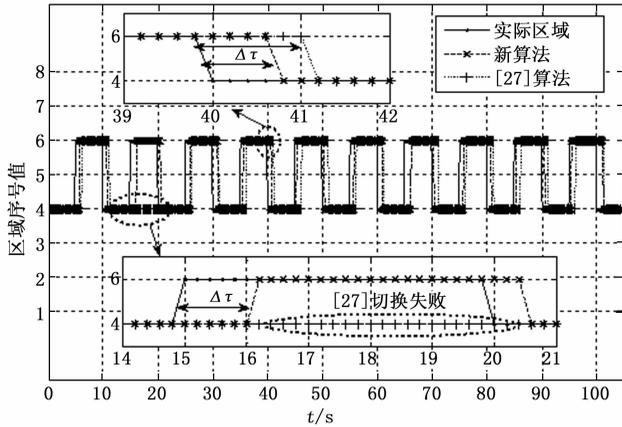


图 11 门 A 反复切换测试结果

切换时延可能在 1 s 左右波动。通过图 11 与表 3 的结果可以发现, 测试结果与理论预期基本一致。

表 3 室内外进出切换统计结果

门位	切换算法	切换成功率 $\zeta$ / %	切换时延 $\Delta\tau$ / s		
			平均	最大	最小
门 A	新算法	100	0.95	1.40	0.60
	[27] 算法	90	1.05	1.60	0.80
门 B	新算法	100	0.90	1.20	0.80
	[27] 算法	100	1.00	1.40	0.80
门 C	新算法	100	0.95	1.40	0.80
	[27] 算法	70	1.40	1.60	1.20
门 D	新算法	100	0.95	1.40	0.80
	[27] 算法	90	1.10	1.40	1.00
门 E	新算法	100	0.90	1.60	0.60
	[27] 算法	100	1.00	1.60	0.80

### 3.2 全场切换测试

全场切换测试是指佩戴有定位标签的工作人员沿着指定路线(图 10 中用带箭头的实线表示路线及行进方向)在场地内行进(共经历 14 次切换), 观察“新算法”和“[27]算法”在实际工程项目中的切换成功率、切换时延以及定位结果与路线测绘值之间的偏差。测试结果如图 12 和表 4 所示。

表 4 全场测试统计结果

切换算法	成功率 $\zeta$	时延 $\Delta\tau$ / s			精度 $\sigma_{95}$ / m
		平均	最大	最小	
新算法	100%	0.85	1.40	0.40	0.21
[27]算法	86%	1.00	1.60	0.80	
不切换	—	—	—	—	0.39

定位轨迹如图 12 所示, 实线为人员在定位区域内实际运动的轨迹, 虚线为非定位区域内实际运动的轨迹, “×”表示使用划分区域并使用“新算法”的定位结果, “+”表示使用划分区域并使用“[27]算法”的定位结果, “·”表示未划分区域的定位结果。区域 6、7、8 不做定位。

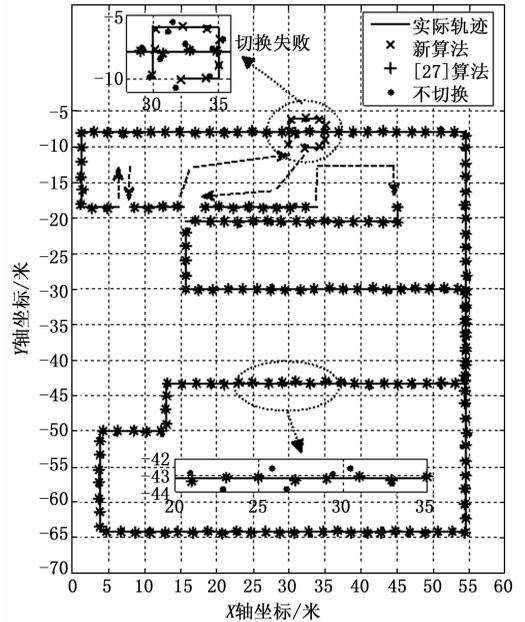


图 12 全场测试定位轨迹图

通过图 12 可以看出, 使用了“新算法”的超宽带定位系统在定位场地内定位轨迹平滑, 与实际运动路线偏差较小; 在不同区域间运动时, 能够实现区域的自动切换, 既可以实现室外区域的切换, 也可以实现室内外区域的切换; 而“[27]算法”在区域 7 切换到区域 1 (在二次设备间经门 C 去到主控楼后的区域) 时出现切换失败, 导致出门后无定位轨迹。性能统计结果如表 4 所示, 全场定位精度约为 0.2 米, 切换时延的平均值小于 1 s 左右。综合图 12 和表 4 的结果可以看出, 划分区域并本文区域切换算法, 可以有效提高定位精度, 基本符合工程场景的应用需求。

此外, 综合章节 2 中切换方案的理论分析以及本章节中图 11、12 和表 3、4 的测试结果, 通过分析可以得出推论:

1) 通过提升定位频率, 可以加快切换方案中的计数器更新频率, 实现降低切换时延的目的; 但是, 提升定位频率后, 会增加定位报文在空中的碰撞概率, 且会增加定位标签的功耗, 所以, 在实际定位工程应用中, 应从系统的角度通盘考虑, 合理制定定位频率。

2) “切入”门限  $\xi_1$  和“切出”门限  $\xi_2$  的设定, 也会影响切换的成功率和时延: 当门限值越接近 0 时, 越容易触发切换, 会降低切换时延, 使得系统较少出现切换失败(应该切换而未发生切换), 但是更容易出现切换错误(不应该切换而发生切换); 反之, 当门限值越远离 0 时, 越难触发切换, 使得系统较少出现切换错误, 但是会增加切换时延, 且更容易出现切换失败。所以, 在工程应用过程中, 在设计该门限值时, 要综合考虑系统的定位精度、切换时延以及切换成功率, 才能保证定位系统的可靠运行。

## 4 结束语

随着超宽带无线定位技术的飞速发展, 基于该技术的定位系统逐渐得到推广, 可以应用于面积更大、环境更复杂的定位场景。通过合理划分定位区域, 可以提高每个定位区域内的定位精度, 进而提高整个定位系统的定位性能。但是这也对区域切换方案和算法提出了较高的要求。

本文提出了一种区域切换方法, 利用区域特征值、区域边界以及残留误差来判断定位结果是否在区域内, 并使用区域计数器来防止切换乒乓现象。经过工程实测试验, 该方法可以有效实现定位区域的可靠切换, 切换成功率 100%, 切换延迟约为 1 s; 同时, 测试结果也可以证明通过合理划分定位区域, 可以有效提高系统的定位精度。

### 参考文献:

[1] 常 娥, 冷卫杰. 工业互联网无线室内定位技术概述 [J]. 物联网学报, 2020, 4 (2): 129-135.

[2] 谭永丽. 基于智能定位技术的无人物流车辆智能监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 89-92, 108.

[3] 常 琳. 煤矿井下无线定位技术及系统的应用现状和发展方向 [J]. 煤矿安全, 2021, 52 (7): 94-98.

[4] 周 静, 杨新章. 无线定位技术浅析 [J]. 广东通信技术, 2021, 41 (9): 21-30.

[5] 陈忠贵, 帅 平, 曲广吉. 现代卫星导航系统技术特点与发展趋势分析 [J]. 中国科学 E 辑, 2009, 39 (4): 686-695.

[6] 喻思琪, 张小红, 李 博, 等. 北斗卫星导航系统 (BDS) 在智能电网的应用与展望 [J]. 中国电力, 2020, 53 (8): 107-116.

[7] 武立平, 马维青, 杨海飞, 等. 北斗监测数据在输电线路杆塔的位移和形变方面的监测与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 79-83, 88.

[8] 彭 宇, 王 丹. 无线传感器网络定位技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25 (5): 389-399.

[9] 宋慧敏, 杨社堂, 赵栋栋. 基于人工神经网络的无线传感器定位算法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 473-475, 502.

[10] 乔 冉, 闫江毓, 唐良瑞. 基于多维高斯的无线传感器网络定位算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (23): 99-104.

[11] 毛 颀, 李明兰, 罗云飞. 基于神经网络和智能 RFID 的室内定位导航系统 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (10): 98-101, 105.

[12] 王 伟, 朱清山. 无线传感器网络圆弧三角形定位算法研究 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (22): 47-50.

[13] 唐小明, 孔繁俊, 朱洪伟, 等. 基于接收信号强度指示的蓝牙信号源定位 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (2): 374-376.

[14] DAVE H. 到达角与出发角方法显著提升蓝牙位置服务性能 [J]. 电子产品世界, 2019, 26 (5): 39-40.

[15] 钱志鸿, 孙大洋, LEUNG V. 无线网络定位综述 [J]. 计算

机学报, 2016, 39 (6): 1237-1256.

[16] 刘振辉, 吴金铭, 林 楠, 等. 无线传感器网络定位算法中的信任评估 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (10): 2733-2741.

[17] 肖 竹, 王勇超, 田 斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾和展望 [J]. 电子学报, 2011, 39 (1): 133-141.

[18] 张令文, 杨 刚. 超宽带室内定位关键技术 [J]. 数据采集与处理, 2013, 28 (6): 706-713.

[19] 肖 竹, 谭光华, 李仁发, 等. 无线传感器网络中基于超宽带的 TOA/AOA 联合定位研究 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50 (3): 453-460.

[20] 张 浩, 刘 兴, GULLIVER T A, 等. 基于单基站天线阵列的超宽带定位 AOA 估计方法 [J]. 电子与信息学报, 2013 (8): 2024-2028.

[21] 张 桀, 沈 重. 联合 TDOA 改进算法和卡尔曼滤波的 UWB 室内定位研究 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (13): 1-5.

[22] 江 歌, 李志华. 非视距环境下的超宽带室内定位算法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 203-207.

[23] 李国友, 宋成全, 孟 岩. 基于超宽带室内定位联合算法的研究 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (7): 93-96, 101.

[24] 常 琳. UWB 技术在精准人员管理系统中的应用 [J]. 煤矿安全, 2021, 52 (5): 163-165, 169.

[25] 尹康涌, 梁 伟, 杨吉斌, 等. 电力作业场景中一种高效的 UWB 和 IMU 融合定位算法 [J]. 中国电力, 2021, 54 (8): 83-90.

[26] 叶 伟. 煤矿井下目标定位的研究现状与展望 [J]. 中国矿业, 2021, 30 (1): 82-89, 105.

[27] 周 群, 沈 重, 张 鲲, 等. 基于融合算法的 GPS/UWB/MARG 协同定位系统研究 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (6): 82-86.

[28] 李玉峰, 张 佩, 王宇鹏. 一种变权重 k 最近邻的室内外无缝定位算法 [J]. 微处理机, 2019, 40 (2): 30-36.

[29] 连小勇, 王茂森, 戴劲松. 基于 GPS/UWB 技术的无缝定位平台设计 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (4): 203-207.

[30] 安子强. 基于分区域步进优化的室内无线传感网络跟踪研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 3155-3157.

[31] 陈伟森, 裴海龙, 夏睿灿. 基于超宽带技术的室内定位系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 179-182.

[32] 肖亚龙, 张士庚, 王建新. 一种基于多维标度和区域细化的无线室内定位方法 [J]. 计算机学报, 2017, 40 (8): 1918-1932.

[33] 刘 辉, 沙立成, 王泽众, 等. 基于 LCS/GA-WKNN 算法的指纹室内定位聚类区域划分及性能评估 [J]. 自动化与仪表, 2021, 36 (7): 101-104.

[34] 周傲英, 杨 彬, 金澈清, 等. 基于位置的服务: 架构与进展 [J]. 计算机学报, 2011, 34 (7): 1155-1171.

[35] 冯 帆, 王 军, 陈小磊, 等. 超宽带室内定位无线时钟同步设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (9): 105-110.