

基于位置重要度的电力仓库定位基站布局研究

尤伟¹, 冯曙明², 金卓¹, 张震宇², 包威², 杨永成², 王涵²

¹国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京

²江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2022年12月1日; 录用日期: 2022年12月29日; 发布日期: 2023年1月9日

摘要

本文为保证电力仓库物资的正常运输和实时监测, 对现有电力物资仓储管理工作提出优化方法。通过设计一种对电力物资进行定位的方法, 基于位置重要度对物资仓库进行室内定位基站的布局与铺设, 针对位置之间的优先级具体分析是否布站, 及时调整基站的数量, 从而有效提升物资定位系统的跟踪精度和稳定性, 实现基站资源和通信数据的最大化利用, 满足电力仓库信息化和智能化运维的需求。

关键词

电力仓库, 物资定位, BLE-UWB定位算法, 基站建设

A Location Importance Based Base Station Layout Study for Power Warehouse Location

Wei You¹, Shuming Feng², Zhuo Jin¹, Zhenyu Zhang², Wei Bao², Yongcheng Yang², Han Wang²

¹State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

²Jiangsu Power Information Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 1st, 2022; accepted: Dec. 29th, 2022; published: Jan. 9th, 2023

Abstract

In order to ensure the normal transportation and real-time monitoring of electric power warehouse materials, an optimization method is proposed for the existing electric power materials warehouse management. By designing a method to locate electric power materials, we lay out indoor positioning base stations in the material warehouse based on the location importance, specifically analyze whether to lay stations for the priority between locations, and adjust the number of base stations in time, so as to effectively improve the tracking accuracy and stability of the material positioning system, realize the maximum utilization of base station resources and commu-

nication data, and meet the information and intelligent operation and maintenance needs of the electric power warehouse.

Keywords

Power Warehouse, Material Location, BLE-UWB Location Algorithm, Base Station Construction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

电力物资的仓库管理是电力企业运作中的重要一环，而电力物资定位的准确性和稳定性无疑关系到电网的安全与稳定运行。然而，在较为封闭的室内环境下，由于建筑物的遮挡以及人员和物品的密集聚集，以 GPS 为代表的室外定位技术的信号在室内受到极大衰减[1]，无法为室内人员提供精确的物资位置信息。

经过多年的研究与发展，室内定位技术愈发成熟。在众多主流室内定位技术中，超宽带定位技术(UWB)以其穿透能力强、抗扰能力出众、定位精度高等优势，在室内定位领域展现出了极强的市场竞争力，得到了较为广泛的应用[2]。而蓝牙(Bluetooth)作为一种短距离低功耗的无线通信标准，其实质是一种短距离无线电技术，可以通过蓝牙配对实现点到点的通信[3]。低功耗、体积小、易于集成在 PC 以及手机中等优点使其应用场景广泛，灵活性强[4]。

为此，本文针对电力物资仓库这一复杂室内环境下多标签实时精准定位的需求，综合考量蓝牙定位技术(BLE)和超宽带定位技术(UWB)，在深度融合两种技术的基础上，提出一种改进的物资定位算法，构建整合 BLE-UWB 物资定位体系。通过标签信号到达各基站的信号强度 RSSI 来判定距离标签最近的基站，以此划分 TDOA 分单元的区域范围，并根据位置之间的优先级进行系统基站的布局与铺设，从而准确掌握并实时更新库存物资的位置、数量和存储情况，优化物资仓储的整体工作流程，实现对电力企业物资的信息化和智能化管理。

2. 整合 BLE-UWB 物资定位体系

2.1. 构建原则

定位精度高。定位系统旨在实现物资的动态监测，通过定位坐标实时了解物资在仓库内的位置和状态[5]。如果存在定位精度较差、存在延时等问题，将会导致预警和处理不及时，给企业造成不可挽回的后果。

能量消耗低。定位系统标签通常是小型设备，功能众多，配备有多个传感器和微控制器，这些都增加了标签的电流消耗。但对于用户来说，频繁给设备充电或更换电池较为麻烦，因此应尽可能地限制追踪器装置等系统设备的能耗[6]。

覆盖范围无死角。物资存放和活动的区域范围通常较大，基站的设计必须能够实现较远的通信距离并且支持大容量标签定位，同时基站需放置在规则多面体的定点上以对目标区域进行空间填充，进而实现扩大定位范围的效果[7]。

成本节约。当定位区域面积较大时，一组基站无法完成定位任务，通常需要铺设大量基站[8]。定位系统的设计需要在实现区域全覆盖的情况下，尽可能使用较少数量的基站，降低系统的整体成本。

2.2. 整合 BLE-UWB 定位算法

技术的选择及使用强度会影响系统的跟踪精度，整合物资定位系统同时运用了低功耗蓝牙(BLE)和超宽带(UWB)两种定位技术，大大提升了使用的灵活性和精准度[2]。

系统的 UWB 部分通过基站测量到达时间，进一步计算到达时间差。由于标签是电池供电，其余的系统设备是电源供电，TDOA 定位只需实现基站间时钟同步以及标签到基站的单向数据传输，测量标签信号到达各基站的时间差进行位置计算，大大提升了定位系统的标签容量及标签低功耗设计。

在 BLE 接口情况下，基站测量接收到的信号强度 RSSI。为了减少无线电信道的影响，采用两个配备不同极化天线的 BLE 接收器进行测量。在基站中执行的测量结果被传输到系统控制器，在系统控制器中进行标签定位的计算。

系统运行期间，标签传输 UWB 和 BLE 数据包。为了节省能量，UWB 数据包的数据有效载荷仅包括计算物资位置所必需的数据：标签标识符和 UWB 数据包序列号。BLE 数据包包含更多数据，除了设备标识符，还包括安装在标签中传感器的数据：标签气压计测得的压力、使用加速度计内置功能计算的距离等。

基站接收数据包并测量 BLE 信号电平和 UWB 数据包到达时间。每个标签数据包中发送的测量结果和数据被组织成一个大型 Wi-Fi 数据包，固定时间发送到系统控制器。基站还重新发送从标签接收到的所有数据，并随附在 BLE 情况下测量的信号强度和在 UWB 情况下测量的到达时间等。

系统控制器接收由基站发送的 Wi-Fi 数据包，并对其进行解码、存储到文件和实时处理，以便计算物资定位[6]。

2.2.1. RSSI 测算

在 BLE 定位领域，常用的算法是利用 RSSI 指标值进行信号衰减距离估计，进而确定标签位置[9]。信号随距离的衰减可以用弗里斯自由空间路径损耗(FSPL)模型来描述。根据不同的操作环境，二次路径损耗指数是一个可调节数 γ 。假设发射器和接收器的天线都是各向同性，则可以通过距离 d_0 处的特定信号强度 $RSSI_{d_0}$ 来校准：

$$RSSI = RSSI_{d_0} - 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

在道路或类似几何体内执行定位的情况下，通常会对定位施加线性约束[3]。对于公式(1)，可运用似然约束定位(CLL)模型，即从 RSSI 距离模型中导出似然函数。在每个信标周围创建一个圆形密度函数 $L(x)$ ，根据测量数据确定半径，并对每个给定测量值进行汇总：

$$L(x) = \sum_i \left\| \frac{\|x - b_i\|_2^2}{d_i^2} - 1 \right\| \quad (2)$$

$$\arg \min_x L(x) \quad \text{s.t. } Ax = b \quad (3)$$

其中， b_i 是信标位置， A 是线性约束矩阵。这个非凸函数可以在给定约束条件下最小化。

2.2.2. TDOA 测算

TDOA 值使用基站测量的到达时间计算。为了获得正确的结果，所有独立测量的到达时间都应以相同的时间为基准。系统使用两类参考基站，主基站是同步信号的唯一来源，它配备有晶体振荡器 TCXO，

提供比其他基站中使用的振荡器更高的时钟频率稳定性和容差[10]。如果它的传输范围不够，并且同步数据包无法到达更多远程基站时，选定的基站可以通过在预定义的时间之后重新传输从主基站接收到的数据包，以此额外执行从基站的角色。

此时，基站出现三个子集：同步到主基站的基站、同步到从基站的基站、可以同步到两类参考基站的基站。因此，在安装时，需要明确基站属于哪一个子集。从基站的角色可以由任意标准基站另外执行，前提是它在主基站传输范围内。

为了进一步简化运算，引入以下值[6]：

$$T_{R1} = T_{P2} + \delta_{PR,T} - (T_{P1} + \delta_{PR,T}) = T_{P2} - T_{P1} \quad (4)$$

$$T_{Mm} = T_{m,2}^{PR} - T_{m,1}^{PR} \quad (5)$$

$$T_{Mn} = T_{n,2}^{SR} - T_{n,1}^{SR} \quad (6)$$

其中，公式(4)表示主基站发送的参考周期，公式(5)和(6)分别代表由两个标准基站 AN_m 和 AN_n 测量的参考周期。 T 表示标签，PR 表示主基站。 T_{P_i} 表示来自主基站的第 i 个同步数据包的传输时间， $T_{j,i}^k$ 表示来自发射器 k 基站 j 的第 i 个数据包的接收时间(k 可以代表主基站 PR 或从基站 SR)； $\delta_{PR,T}$ 表示主基站的内部传输延迟。

此外，从基站计算出的同步数据包传输次数可以用主基站的时基表示：

$$T_{S1} = T_{P1} + \delta_{PR,T} + t_{Pm} + \delta_{m,R} + T_D \frac{T_{R1}^-}{T_{Mm}^-} \quad (7)$$

$$T_{S2} = T_{P2} + \delta_{PR,T} + t_{Pm} + \delta_{m,R} + T_D \frac{T_{R1}}{T_{Mm}} \quad (8)$$

其中， T_{S_i} 表示来自从基站的第 i 个同步数据包的传输时间， T_{P_i} 表示来自主基站的第 i 个同步数据包的传输时间， t_{Pm} 表示发射器 P 和基站 m 之间的传播时间， $\delta_{PR,T}$ 表示主基站的内部传输延迟， $\delta_{m,R}$ 代表第 m 个基站的内部传输和接收延迟， T_D 表示同步数据包在从基站的传输延迟。 T_{R1}^- 和 T_{Mm}^- 表示来自上一个传输周期的时期，因此“-”标为上标。用缩放因子 $\frac{T_{R1}^-}{T_{Mm}^-}$ 和 $\frac{T_{R1}}{T_{Mm}}$ 来补偿从基站的时钟信号源漂移和相对于主基站的标称频率公差。根据 T_{S1} 和 T_{S2} 值，由从基站传输的参考周期如下：

$$T_{Rm} = T_{S2} - T_{S1} \quad (9)$$

1) 时基统一

所有基站的时基都需要与主基站对齐，这可以通过估计基站和主基站内部计数器之间的偏移量来实现。基站 AN_m 和 AN_n 的偏移量表示为公式(10)和(11)：

$$\Delta T_m^{PR} = T_{m,1}^{PR} - T_{P1} - t_{Pm} - \delta_{PR,T} - \delta_{m,R} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_n^{PR} &= T_{n,1}^{SR} - T_{S1} - t_{Sn} - \delta_{n,R} \\ &= T_{n,1}^{SR} - T_{P1} - \delta_{PR,T} - t_{Pm} - \delta_{m,R} - T_D \frac{T_{R1}^-}{T_{Rm}^-} - t_{Sn} - \delta_{n,R} \end{aligned} \quad (11)$$

2) 时钟漂移和标称频率差校正

由晶体振荡器容差和稳定性引起的时钟频率偏差是到达时间测量误差的来源。在接收同步数据包时，主基站计数器与本地计数器之间的偏移量已知，但随着时间的推移，由于温度变化等原因，该偏移量可能会增大。在接收到下一个同步数据包之前，它有达到极值的趋势。 AN_m 和 AN_n 的标签数据包接收时刻

对应的偏移值可以用公式(12)和(13)来表示:

$$\Delta C_m = (T_{m,1}^T - T_{m,1}^{PR}) \frac{T_{Mm} - T_{R1}}{T_{Mm}} \quad (12)$$

$$\Delta C_n = (T_{n,1}^T - T_{n,1}^{SR}) \frac{T_{Mn} - T_{Rm}}{T_{Mn}} \quad (13)$$

3) TDOA 计算

AN_m 和 AN_n 所测量的标签数据包到达时间可以用公式(14)和(15)校正:

$$T_{m,1,Corr}^T = T_{m,1}^T - \Delta T_m^{PR} - \Delta C_m \quad (14)$$

$$T_{n,1,Corr}^T = T_{n,1}^T - \Delta T_n^{PR} - \Delta C_n \quad (15)$$

导出计算 $TDOA_{n,m}$ 的公式:

$$T_{n,1}^T - \delta_{n,R} - t_{Tn} = T_{m,1}^T - \delta_{m,R} - t_{Tm} \quad (16)$$

它可以改写为:

$$TDOA_{n,m} = t_{Tn} - t_{Tm} = T_{n,1}^T - \delta_{n,R} - T_{m,1}^T + \delta_{m,R} \quad (17)$$

通过将 $T_{m,1}^T$ 和 $T_{n,1}^T$ 替换为其校正版本, 即公式(14)和(15)所示, 可以得到以下公式:

$$TDOA_{n,m} = T_{n,1}^T - \Delta T_n^{PR} - \Delta C_n - T_{m,1}^T + \Delta T_m^{PR} + \Delta C_m + \delta_{m,R} - \delta_{n,R} \quad (18)$$

在公式(18)中包含公式(10)~(13), 并进行简化和重新排列后, 可以推导出 $TDOA_{n,m}$ 计算的最终公式:

$$\begin{aligned} TDOA_{n,m} = & T_{n,1}^T - T_{m,1}^T + T_{m,1}^{PR} - T_{n,1}^{SR} + T_D \frac{T_{R1}^-}{T_{Rm}^-} + t_{Sn} \\ & + (T_{m,1}^T - T_{m,1}^{PR}) \frac{T_{Mm} - T_{R1}}{T_{Mm}} - (T_{n,1}^T - T_{n,1}^{SR}) \frac{T_{Mn} - T_{Rm}}{T_{Mn}} + \delta_{m,R} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, 除从基站内部接收延迟 $\delta_{m,R}$ 之外的所有内容为已知。通过进行校准测量, 将两个参考基站、一个标准基站和标签放置在已知的位置, 并且收集一组 TDOA 测量结果, 通过平均这些结果并减去它们, 进而由基站坐标和基站内部接收延迟 $\delta_{m,R}$ 计算得到 $TDOA_{n,m}$ [6]。

2.2.3. 定位算法

使用整合 BLE-UWB 定位算法对物资进行定位。本算法利用了接收信号强度(RSSI)和所测量的到达时间差(TDOA), 使用无迹卡尔曼滤波(UKF)融合上述测量结果[11]。运用 UKF 时, 本机物资被建模为一个动态系统, 在给定时刻 k 的状态被描述为一个状态向量:

$$x = \begin{bmatrix} x & v_x & y & v_y \end{bmatrix} \quad (20)$$

该矢量包含有关物资位置(x, y 坐标)和移动速度(速度分量 v_x, v_y)。通过跟踪由标签和基站测得的大气压力之间的变化, 标签的高度可以用楼层水平精度来估计。在这种情况下, 只有放置在物资所在高度上的基站用于定位。

无迹卡尔曼滤波算法包括两个阶段: 时间更新阶段和测量更新阶段。时间更新阶段使用以下两个公式实现:

$$\hat{x}_{k(-)} = F \hat{x}_{k-1(+)} \quad (21)$$

$$P_{k(-)} = F P_{k-1(+)} F^T + Q \quad (22)$$

其中, $\hat{x}_{k(-)}$ 和 $\hat{x}_{k-1(+)}$ 分别是预测的状态向量值和前一个 UKF 迭代的结果。矩阵 $P_{k(-)}$ 和 $P_{k-1(+)}$ 是对应的协方差矩阵。时间更新包括使用离散白噪声加速度(DWNA)运动模型预测当前物资的速度和位置。根据该模型, 所分析的两个时刻之间的物资运动是均匀线性的, 物资的加速度被视为白噪声。该模型由状态转移矩阵 F 和过程噪声协方差矩阵 Q 定义:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \Delta t^2 & \frac{1}{2}\Delta t^3 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\Delta t^3 & \frac{1}{2}\Delta t^4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t^2 & \frac{1}{2}\Delta t^3 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\Delta t^3 & \frac{1}{4}\Delta t^4 \end{bmatrix} \sigma_a^2 \quad (23)$$

其中, Δt 是系统定位率, σ_a^2 是物资加速度的方差。

在测量更新阶段, 根据系统返回的测量结果更新状态向量的预测。更新后的状态向量是预测值和实际测量结果与预测物资位置乘以卡尔曼增益 K 所获得的结果的差值的组合。执行上述操作需要预先计算预测的测量结果和对应的协方差矩阵。它可以由通过假设的传感器模型传播状态向量完成:

$$h(x_k) + v_k = [RSSI_1(x_k) \cdots RSSI_m(x_k) TDOA_1(x_k) \cdots TDOA_n(x_k)] + v_k \quad (24)$$

其中, $RSSI_i(x)$ 和 $TDOA_j(x)$ 分别是 BLE 的 RSSI 值和 UWB 测量的 TDOA 值。更新后的状态向量均值 $\hat{x}_{k(+)}$ 和协方差矩阵 $P_{k(+)}$, 即为 UKF 迭代的最终结果。

$$\hat{x}_{k(+)} = \hat{x}_{k(-)} + K(z_k - \hat{z}_k) \quad (25)$$

$$P_{k(+)} = P_{k(-)} - KPK^T \quad (26)$$

其中, K 为卡尔曼增益, z_k 是一个向量, 包含系统控制器返回的所有测量结果[6]。

3. 定位区域划分

当定位区域面积较大时, TDOA 系统通常需要铺设大量基站, 理想方案是实现定位区域内全部基站的时钟同步后进行 TDOA 值测量。然而 UWB 信号传输距离有限, 主基站与其相距较远的从基站需要采用多跳网络实现时钟同步, 这必然会造成时钟同步的误差累积, 严重影响到达时间差测量的精确度。

因此, 整合算法根据时钟同步单元(时钟同步单元包括 1 个主基站以及多个与主基站进行单跳网络时钟同步的从基站)的分布将定位区域划分成多个定位单元, 形成 TDOA 分单元定位。分单元定位系统采用各定位单元接收到定位请求信号后独立完成定位计算的方式, 但是同一标签发射的定位请求信号通常会被相邻的定位单元同时接收到, 导致在噪声环境中存在相邻定位单元将同一标签定位在不同位置的问题, 造成定位系统稳定性下降[7]。

根据整合 BLE-UWB 定位算法, 定位标签到第 i 个基站的距离 $d_{\max,i}$ 可以由接收信号强度 $RSSI_i$ 定义为:

$$d_{\max,i} = 10^{\frac{MAXRSSI - RSSI_i}{10\gamma}} \quad (27)$$

其中, $MAXRSSI$ 的值是 LOS 为 1 m 时的最大接收信号强度。

根据公式(27)将物资仓库分成若干个定位单元——TDOA 分单元定位。为了解决噪声干扰导致系统稳定性下降的问题, 在 TDOA 分单元独立定位中通过标签信号到达各基站的信号强度 $RSSI$ 来判定距离此

标签最近的基站，并由此基站所在的定位单元负责该物资的位置定位，以大大提高物资定位的精确性。进而根据各分单元的区域范围进行基站的铺设，在保证区域信号全覆盖的同时最大化利用基站，有效降低系统成本。

在电子物资定位的实际应用中，可以基于精度和稳定性的要求，设定 $RSSI_i$ 的下限 $RSSI^0$ ，即

$$RSSI_i \geq RSSI^0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (28)$$

结合公式(27)和(28)，则可以得出主基站能够覆盖的区域半径为：

$$d^0 = 10^{\frac{MAXRSSI - RSSI^0}{10\gamma}} \quad (29)$$

由此，可以根据半径将仓库划分为不同的基站覆盖区域，根据主基站的覆盖范围具体分析基站建设位置。在实际建设系统基站时，首先选取电力仓库内部的关键位置直接布置主基站点，然后根据位置的重要程度进行优先级排序，在优先级最高的点设置关键主基站，再根据定位标签到基站的距离 d 设置其余的主基站点。最后，对设置的所有基站点重新进行评估，若某基站到相邻两基站的距离之和 D 小于 $2d$ ，则剔除该冗余基站，否则，则在该基站与相邻两基站之间的 $1/2$ 距离处补设一个基站。

4. 性能分析

为了检验所设计的整合 BLE-UWB 定位算法进行电力仓库定位的准确性，选取一个 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的测试区域，该区域存在货架、金属等射频干扰，符合复杂室内环境的要求。

在 NLOS 环境下进行静态定位测试以分析其定位精度情况。本系统根据实际定位环境，选取实验场地中用于摆放电力物资的货架旁作为定位标签的试验位置，具体的位置坐标为(14.28 m, 6.80 m)。根据改进定位算法设置的 6 个基站进行定位 300 次后绘制散点图，具体如图 1 所示：

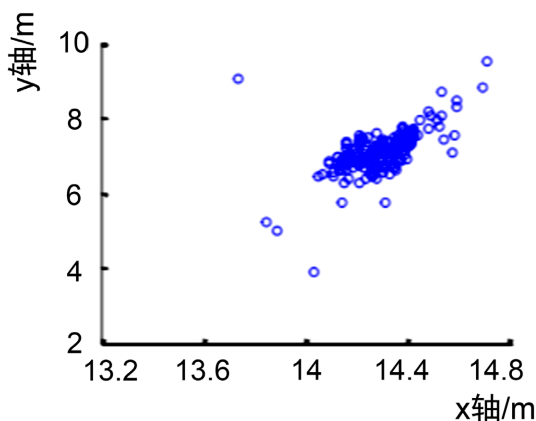


Figure 1. Positioning scatter plot at (14.28 m, 6.80 m)
图 1. (14.28 m, 6.80 m)定位散点图

由上图可知，在 NLOS 环境下，由于多径干扰和非视距的影响，系统在每个方向轴的误差为 $\pm 40 \text{ cm}$ ，定位误差在可接受范围之内，符合系统定位精度预期。

5. 结论

本文重点研究了一种基于位置重要度的电力仓库定位基站布局方法，深度融合 BLE 和 UWB 定位技术实现对基站的科学有效布局，优化后的定位基站布局设计可为电力物资仓库的安全运维提供新的技术保障。主要研究成果如下：1) 深度整合低功耗蓝牙(BLE)和超宽带(UWB)两种定位技术的优点，使用无

迹卡尔曼滤波(UKF)融合接收信号强度(RSSI)和所测量的到达时间差(TDOA),提高了定位算法的灵活性和精度。2) 整合 BLE-UWB 定位算法将电力物资仓库划分成多个 TDOA 定位单元,通过信号强度 RSSI 测算物资到各基站的距离并选定最近基站所在定位单元进行定位,最后根据各分单元的区域覆盖范围进行基站实际铺设,具有很高的实用价值。3) 通过测试发现,相对于普通的定位算法,改进后的算法对定位精度和准确性有明显的提升,能够满足电力物资仓库的定位需求。该算法实现了对基站建设资源和通信数据的最大化利用,能够实时准确地掌握电力仓库物资的运输状态和存储情况,为企业管理者进一步安排后续工作提供了可靠的依据和基础。

参考文献

- [1] 曹祥红, 张华. 基于 UWB 的地下停车场车辆定位系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2017, 40(9): 136-140.
- [2] 闫大禹, 宋伟, 王旭丹, 胡子焯. 国内室内定位技术发展现状综述[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 5-12.
- [3] Georg, F., Joan, B., Dominik, J.S., et al. (2022) Multimodal Indoor Localization: Fusion Possibilities of Ultrasonic and Bluetooth Low-Energy Data. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 5857-5868. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148529>
- [4] 苏松, 胡引翠, 卢光耀, 董硕, 李晓进, 刘长宏. 低功耗蓝牙手机终端室内定位方法[J]. 测绘通报, 2015(12): 81-84+97.
- [5] 陈小斯, 沈重, 周群, 张鲲, 郑理强. 基于 TDOA 算法的差分 UWB 室内定位系统研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(6): 45-49.
- [6] Jerzy, K., Vitomir, D.J., Marcin, K., et al. (2020) UWB/BLE Tracking System for Elderly People Monitoring. *Sensors*, **20**, Article No. 1574. <https://doi.org/10.3390/s20061574>
- [7] 邓中亮, 尹露, 唐诗浩, 刘延旭, 宋汶轩. 室内定位关键技术综述[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(3): 14-23.
- [8] 韦子辉, 王世昭, 叶兴跃, 马英杰, 李小阳, 方立德. 基于超宽带的 TDOA 相邻单元协同定位技术[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 77-83.
- [9] 杨保, 张鹏飞, 李军杰, 等. 一种基于蓝牙的室内定位导航技术[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 89-95.
- [10] 罗勃, 沈重, 朱雨豪. 无线时钟同步算法在 UWB 定位技术中的研究与应用[J]. 现代电子技术, 2017, 40(6): 31-34+39.
- [11] 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.