

考虑定位误差的电力物资电子围栏设计研究

成义新¹, 张震宇², 包威², 许春阳¹, 冯曙明², 杨永成², 宋港波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11月22日; 录用日期: 2022年12月21日; 发布日期: 2022年12月29日

摘要

为提升物资出入库轨迹的准确率、管理效率和灵活性, 提出一种考虑定位误差的电力物资电子围栏的设计方法。通过整合BLE-UWB技术的物资定位系统返回的位置信息, 与预先设定的电子围栏区域进行比较, 判定目标物资的当前状态, 及时发出或关闭告警信号。同时充分考虑定位误差, 根据电力企业的实际应用需求, 可以灵活制定警示区域的阈值, 从而实现对物资仓库的智能化管理。

关键词

定位误差, 电力物资, 电子围栏

Research on Electronic Fence Design of Power Materials Considering Positioning Error

Yixin Cheng¹, Zhenyu Zhang², Wei Bao², Chunyang Xu¹, Shuming Feng², Yongcheng Yang², Gangbo Song²

¹State Grid Jiangsu Electric Power Co., Nanjing Jiangsu

²Jiangsu Power Information Technology Co., Nanjing Jiangsu

Received: Nov. 22nd, 2022; accepted: Dec. 21st, 2022; published: Dec. 29th, 2022

Abstract

In order to improve the accuracy, management efficiency and flexibility of the trajectory of materials in and out of the warehouse, a design method of electronic fence of power materials considering positioning error is proposed. The location information returned by the material position-

ing system with the integration of BLE-UWB technology, is compared with the pre-set electronic fence area to determine the current status of the target material and timely send or close the alarm signal. At the same time, the positioning error is fully considered, and the threshold of warning area can be flexibly formulated according to the actual application requirements of power enterprises, so as to realize the intelligent management of material warehouse.

Keywords

Positioning Error, Power Materials, Electronic Fence

Copyright © 2022 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/>



Open Access

1. 引言

随着物联网与人工智能的发展,无线室内定位技术在社会与经济的各行各业及不同场景得到了广泛应用。其中,电力仓库场景下的电子围栏就是无线室内定位技术与电力物资位置运动轨迹监控需求相结合而衍生出的一种智能技术。

在红外线、超声波、射频识别等众多室内定位技术中[1],超宽带(Ultra Wide Band, UWB)技术凭借着传输速率快、功耗较低、整体成本相对偏低、抗干扰效果良好、安全指标较为理想以及精度理想等多方面的优势脱颖而出[2],但也存在着一些不足,例如 UWB 接收器要求以相对于脉冲速率的时间非常高的精度来进行信号采集、同步和跟踪,因此相对耗时[3]。除了 UWB 技术,蓝牙(Bluetooth, BLE)技术因其低功耗、体积小、易于集成的特点也受到了业界不少关注,其实质是一种短距离无线电技术,通过蓝牙配对可实现点到点的通信[4],但其定位精度较低,测量值会受到噪声、环境和多径效应的严重影响[5]。由于使用单一技术进行室内定位存在着各种各样的缺陷,因而部分学者开始研究多技术融合进行室内定位。武涛等人提出一种基于 WiFi 和蓝牙融合的误差区域加权定位算法[6],并用实验证明该算法在定位精度和稳定性方面有显著提升; Alvarez-Merino 等人的研究表明在建筑场景中 UWB 和 WiFi 技术的融合能显著提高定位精度[7]; Kolakowski 等人提出一种用于老年人监护的 UWB-BLE 跟踪系统,定位精度和能量消耗情况均明显改善[8]。

电子围栏系统作为空间目标监测的重要工具,对空间目标进行监测和分类,预测可能发生的碰撞,可以保护工作人员正常的空间活动,受到了广泛关注。Qiang 提出了一种基于智能视频监控和无线局域网技术的电子围栏系统方法,对商业区域的异常情况进行判断、定位和记录[9]。晏勇等人设计了一种基于 WSN 和 UWB 多点融合畜牧业的电子围栏系统方案,该系统工作稳定性好、定位精度高、响应速度也快[10]。王庆珺等人利用 AIS、视频监控等技术,设计出海上风电场电子围栏警戒区域和预警机制,满足了海上风电场安全智慧运维的需求[11]。

尽管与无线室内定位技术相关的文献较为丰富,但研究 UWB 和 BLE 融合技术的文献相对较少,且极少有文献将 UWB-BLE 技术应用于电力物资定位的场景,并研究出满足电力物资位置运动轨迹监控预警需求的电子围栏系统。针对当前电力仓库实际复杂环境出现的基于定位算法定位精度不准确、告警信号不及时、预警资源存在浪费的现象,本文提出一种考虑定位误差的电力物资电子围栏设计方法,通过整合 BLE-UWB 技术的物资定位系统返回的位置信息,与预先设定的电子围栏区域进行比较,判定目标

物资的当前状态，并及时发出或关闭告警信号，从而对电力物资违规或突发情况进行高精度预警。同时充分考虑定位误差，根据电力企业实际应用需求，可以灵活地制定警示区域的阈值，从而有效提升物资出入库轨迹的准确率、管理效率和灵活性，实现对物资仓库的智能化管理。

2. 电子围栏系统构建

2.1. 构建原则

低功耗。电子围栏系统要能够连续长时间、不间断工作，并能在不影响系统运转的情况下做到模块在线测试、更新、加载，因此，系统能源供应问题需要得到解决。该系统需满足不同芯片的供电需求，使电能转换效率最大化，并保持电压输出稳定[10]。

实时通信。电子围栏系统的前端设备和后台综合管理平台服务器之间需要持续保持通信传输，以了解物资在仓库内的运输状况。此过程应实现实时追踪，一旦发生突发情况，系统能够主动发起告警，保证对预警信号及时进行信息统计和有效处理[12]。

简单易用。电子围栏的系统维护应尽量集中、简单，避免系统维护开销过大，减轻维护人员的负担，提高网管和决策的效率[10]。同时，系统应该提供友好的操作界面，便于仓库管理人员的操作和管理。

2.2. 系统架构

根据整合 BLE-UWB 技术特点和电力企业实际需求，本文提出的电子围栏系统主要由前端设备和后台综合管理平台服务器组成[11]。后台服务器向前端设备发送指令，前端设备接收到指令后进行相应工作，并把采集到的物资状态数据上传到服务器实现两者的通信传输过程，从而达到对电力物资动态跟踪、监控和预警的目的。

当检测到的物资活动位置在预设的电子围栏范围内，前端设备显示正常运输，后台服务器接收到数据后形成物资活动轨迹。而一旦探测器发现异常，即所检测到的物资活动位置未落入电子围栏预先设定的范围内，前端设备就会立即发送报警信号，警示物资存在异常，形成并发送报警记录到后台综合管理平台，并跟踪此事件是否在后续一定时间间隔内得到妥善解决，从而起到及时保障物资安全的作用[12]。

系统可以根据物资的重要性制定灵活统一的告警级别来约束告警信息发送的合理性，后台综合管理平台服务器会对每一条告警信息进行数据保存，以方便仓库管理员定期进行数据分析和问题跟踪反馈。

图 1 为电子围栏工作数据流。

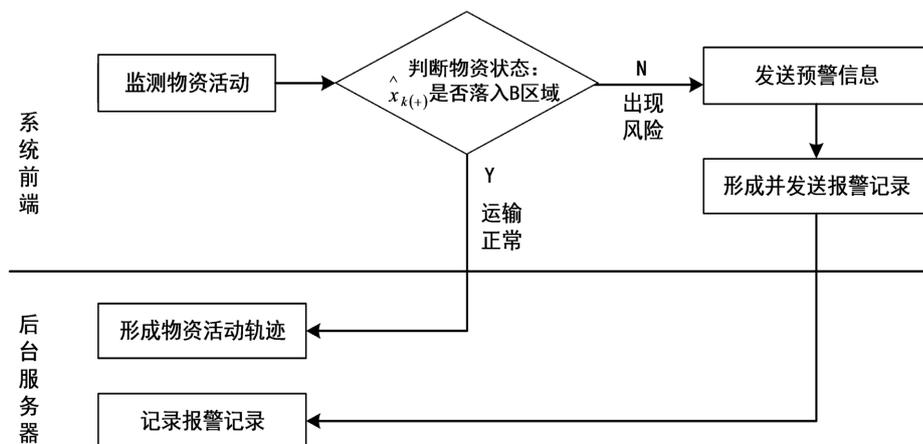


Figure 1. Working data flow of electronic fence

图 1. 电子围栏工作数据流

3. 物资定位测算

本文综合考量 BLE 和 UWB 测距定位技术取长补短, 使用整合 BLE-UWB 定位算法对物资进行定位, 即利用接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)和到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)测算物资的坐标位置, 并使用无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)融合上述测量结果, 以大大提高测距定位精度。

3.1. RSSI 计算

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, 标签附着在电力物资上, 标签位置即电力物资所在位置[13]。信号随距离的衰减可以用弗里斯自由空间路径损耗(Free-Space Path Loss, 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 。此外, 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:

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

在过道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[5], 以删除不在约束附近的标签位置。运用似然约束定位模型, 即从 RSSI 距离模型中导出似然函数, 在每个基站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 是基站位置, 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。

3.2. TDOA 计算

在整合 BLE-UWB 物资定位算法下, 利用超宽带(UWB)部分测量标签发出的信号到接收基站间的到达时间, 通过基站同步进一步得到到达时间差(TDOA)。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期为基准。基站配有不同频率容差和稳定性的振荡器, 它们的频率会因为温度变化而漂移[14]。为了提供高精度, 使用混合解决方案下的同步程序对这些偏移进行补偿。基站的同步通过利用放置在已知位置的参考基站来实现。

通过时钟漂移和标称频率差校正来进行校准测量, 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 $TDOA_{n,m}$ [8]:

$$\begin{aligned} TDOA_{n,m} = & T_{n,1}^T - T_{m,1}^T + T_{m,1}^{PR} - T_{n,1}^{SR} + T_D \frac{T_{R1}^-}{T_{Rm}^-} + t_{Sn} \\ & + (T_{m,1}^T - T_{m,1}^{PR}) \frac{T_{Mm} - T_{R1}}{T_{Mm}} - (T_{n,1}^T - T_{n,1}^{SR}) \frac{T_{Mn} - T_{Rm}}{T_{Mn}} + \delta_{m,R} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $T_{j,l}^l$ 表示发射器 l 发送给基站 j 第 1 个数据包的接收时间, l 可以代表主基站 PR, 从基站 SR, 或标签 T; T_D 表示同步数据包在从基站的传输延迟; T_{R1} 表示主基站发送第 1 个数据包的参考周期, T_{Rm} 表示从基站传输的参考周期, T_{Mm} 和 T_{Mn} 分别代表由 AN_m 和 AN_n 测量的参考周期; T_{R1}^- 和 T_{Rm}^- 表示来自上一个传输时期的周期, 因此“-”标为上标; t_{Sn} 表示从基站和基站 AN_n 之间的传播时间。

3.3. UKF 融合

使用无迹卡尔曼滤波(UKF)融合 BLE 接收信号强度(RSSI)和 UWB 所测量的 TDOA 值, 测算出更新后的物资定位状态向量。首先, 在运用无迹卡尔曼滤波算法时[8], 本机物资被建模为一个动态系统, 该系统在给定时刻 k 的状态被描述为一个状态向量:

$$x = \begin{bmatrix} x & v_x & y & v_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

该向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)的信息。

接着, UKF 包括两个阶段: 时间更新阶段和测量更新阶段[8]。

时间更新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。时间更新阶段使用以下两个公式实现:

$$\hat{x}_{k(-)} = F\hat{x}_{k-1(+)} \quad (6)$$

$$P_{k(-)} = FP_{k-1(+)}F^T + Q \quad (7)$$

其中, $\hat{x}_{k(-)}$ 和 $\hat{x}_{k-1(+)}$ 分别是在给定 k 时刻下的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; F 为状态转移矩阵, Q 为过程噪声协方差矩阵。

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:

$$h(x_k) + v_k = \begin{bmatrix} RSSI_1(x_k) \cdots RSSI_m(x_k) TDOA_1(x_k) \cdots TDOA_n(x_k) \end{bmatrix} + v_k \quad (8)$$

其中, $RSSI_i(x)$ 和 $TDOA_j(x)$ 分别是 BLE 的 RSSI 值和 UWB 测量的 TDOA 值。

最后, 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:

$$\hat{x}_{k(+)} = \hat{x}_{k(-)} + K(z_k - \hat{z}_k) \quad (9)$$

$$P_{k(+)} = P_{k(-)} - KPK^T \quad (10)$$

其中, K 为卡尔曼增益[15]; z_k 是一个向量, 包含系统返回的所有测量结果。

4. 电子围栏设计方法

由上述卡尔曼滤波估计式可知, 基于 RSSI 和 TDOA 值对更新后的物资定位的估计式为 $\hat{x}_{k(+)}$, 且对应估计的协方差矩阵为 $P_{k(+)}$; 同时由离散白噪声加速度(DWNA)运动模型可知物资的运动被视为白噪声过程, 因此物资运动在每个采样点应该服从多元正态分布。考虑物资定位的测量误差, 则可以设定电子围栏为:

$$B = x_{k(+)} \pm P_{k(+)}^T S_r P_{k(+)} \quad (11)$$

$$S_r = \begin{pmatrix} S_{r,1} & & & \\ & S_{r,2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & S_{r,n} \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中, B 表示电子围栏的设定区域, 通过 $\hat{x}_{k(+)}$ 与 B 的比较可以判断物资活动轨迹是否符合运输既定

范围的要求, 如果不符合要求, 电子围栏则会立即发出预警信号, 警示物资存在异常, 形成并发送报警记录到系统的后台综合管理平台; 如果符合设置要求, 电子围栏则不会发出告警信息, 而是形成正常的物资活动轨迹。

$P_{k(+)}^T$ 表示 $P_{k(+)}$ 的转置, S_r 为每个样本点的对角线矩阵, $P_{k(+)}^T S_r P_{k(+)}$ 则表示物资定位的测量误差项, 不同的测量误差下, 所设定的电子围栏区域也将不同。根据电力企业的实际警示要求来设置每个分区单元 r 的 $S_{r,1}, S_{r,2}, \dots, S_{r,n}$, $S_{r,i}$ ($i=1, \dots, n$) 取值越小则说明警示区域越小, 从而对物资的监测越严格。此外, $S_{r,i}$ 的取值还可以根据对各方向偏差的重要性进行灵活地设置, 以实现基站信号的最大化利用, 从而避免无效报警和公共通信资源的浪费。

5. 结论

本文融合使用低功耗蓝牙(BLE)和超宽带(UWB)两种定位技术, 克服了单一定位技术的不足, 大大提高了整个定位系统的精度, 并设计出一种考虑定位误差的电力物资电子围栏系统, 该系统旨在针对非既定运输轨道的物资设置电子围栏探测器, 形成一道电子围墙, 对物资的违规或突发情况进行有效防范和及时预警, 从而起到及时保障物资安全的作用。同时充分考虑定位误差, 根据电力企业的实际应用需求, 可以灵活地制定警示区域的阈值, 从而实现物资仓库的智能化管理。与电力企业传统的物资仓库管理方式相比, 本文所设计的整个电子围栏系统稳定可靠、误报率低、定位精度高、响应速度快、设置灵活, 能够给电力企业带来较高的实用价值与前景。

参考文献

- [1] 邓中亮, 尹露, 唐诗浩, 等. 室内定位关键技术综述[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(3): 14-23.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 苏松, 胡引翠, 卢光耀, 等. 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] 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>
- [6] 武涛, 王冠凌, 代广珍, 等. 基于 WiFi 和蓝牙融合的误差区域加权算法研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(3): 52-59.
- [7] Alvarez-Merino, C.S., Khatib, E.J., Luo-Chen, H.Q., et al. (2022) WiFi FTM and UWB Characterization for Localization in Construction Sites. *Sensors*, **22**, 5373. <https://doi.org/10.3390/s22145373>
- [8] Kolakowski, J., Djaja-Josko, V., Kolakowski, M., et al. (2020) UWB/BLE Tracking System for Elderly People Monitoring. *Sensors*, **20**, 1574. <https://doi.org/10.3390/s20061574>
- [9] Qiang, T. (2022) Engineering Design of Electronic Fence System Based on Intelligent Monitoring and Wireless Local Area Network. *Alexandria Engineering Journal*, **61**, 2959-2969. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.019>
- [10] 晏勇, 刘强, 赵晓雨, 等. 基于 WSN 和 UWB 多点融合畜牧业电子围栏设计[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 68-74.
- [11] 王庆珺, 陈巍博, 李东阳. 海上风电场运营期电子围栏警戒区域和预警机制设计[J]. 港口科技, 2021(9): 44-48.
- [12] 何豪杰, 熊卫卫, 黄东林. 基于智能电子围栏技术的老年人监护系统设计[J]. 价值工程, 2020, 39(1): 161-162.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.