

UWB 与蓝牙融合的室内人员定位系统优化设计研究

张 峰

杭州品铂科技有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：针对室内定位中 UWB 技术非视距衰减显著、蓝牙 RSSI 漂移严重的问题，提出异构融合定位优化架构。通过加权最小二乘法融合 UWB 测距与蓝牙 RSSI 观测数据，建立基于测距可靠性动态加权的初始解算模型；设计扩展卡尔曼滤波速度修正策略抑制动态误差；构建三级时空同步机制实现纳秒级时钟对齐。实验室静态测试显示融合系统定位均方根误差为 0.3 m，实际场景动态跟踪最大速度偏差低于 0.5 m/s。该系统在智慧建筑、应急疏散等场景具备亚米级实时定位能力。

【关键词】：室内定位；UWB 与蓝牙融合；加权最小二乘；卡尔曼滤波；时空同步

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.054

引言

室内精准定位是智慧医疗、工业监控等场景的核心基础技术。传统单一技术方案面临关键瓶颈：UWB 在非视距环境下测距误差显著增大，蓝牙 RSSI 受多径效应影响定位漂移严重。现有研究多聚焦单一算法优化，未充分挖掘异构数据互补特性。本研究提出融合架构，通过解耦定位层、网络层与应用层，构建可扩展的时空基准优化体系。该设计兼具 UWB 高精度时序特性与蓝牙高密度覆盖优势，为复杂室内环境提供厘米级实时定位服务。

1 室内融合定位系统的需求分析与总体架构设计

面向智慧建筑、医疗监护与应急疏散等场景，室内人员定位需同时满足亚米级精度、秒级刷新与百节点并发，单一 UWB 虽精度高却易受非视距衰减，蓝牙 5.x RSSI 密度大却漂移显著；因此提出“UWB 提供时空基准、蓝牙补充密度”的异构融合需求，将定位层、网络层与应用层解耦，以可扩展服务化架构应对未来功能演进，系统以边缘网关为融合核心，UWB 锚点布设于走廊交叉口形成 4 m×6 m 基准网格，蓝牙信标以 3 m 间距填充房间盲区，终端标签分时触发 UWB 双边双向测距与蓝牙广播扫描，通过 MQTT 上报原始观测，云端解算后回传厘米级坐标，边缘网关作为融合核心，需具备轻量化异构数据预处理能力，一方面对 UWB 测距数据进行非视距误差抑制，采用卡尔曼滤波平滑蓝牙 RSSI 漂移，另一方面通过时间戳对齐实现时空基准的统一校准，确保不同模态数据在同一时间维度下融合；终端标签采用低功耗 MCU 与双模射频模块集成设计，支持动态调整 UWB 测距频率与蓝牙扫描间隔，在保证定位性能的前提下延长电池续航至 6 个月以上，同时标签内置三轴加速度传感器，可触发动态定位模式——当人员移动时提升刷新频率，静止时降低功耗以节省资源；网络层采用 MQTT-SN

协议适配低功耗终端，边缘网关与云端之间通过 HTTP/2 实现高并发数据传输，针对智慧建筑中墙体遮挡较多的区域，可通过增加中继节点扩展信号覆盖范围，应急疏散场景下系统可优先保障高优先级终端的定位服务，确保救援人员与被困人员的位置信息实时可靠；应用层提供 RESTful API 接口，遵循开放标准允许第三方系统快速集成，医疗监护系统可获取患者实时位置并触发越界报警，智慧建筑能耗管理系统可结合位置信息优化能耗分配。

2 UWB 与蓝牙融合定位的核心优化算法设计

2.1 基于加权最小二乘的融合定位初始解算方法

针对 UWB 测距精度高但易受非视距传播影响、蓝牙 RSSI 密度大但存在多径衰减的问题，提出基于加权最小二乘的异构数据融合定位框架。首先建立 UWB 测距模型：设目标位置为 $p = [x, y]^T$ ，第 i 个 UWB 锚点坐标为 $a_i = [x_i, y_i]^T$ ，测距值为 d_i ，则观测方程为：

$$d_i = \|p - a_i\| + n_{UWB} + b_{NLOS}$$

其中， n_{UWB} 为高斯白噪声（标准差 $\sigma_{UWB} = 0.05$ m）， b_{NLOS} 为非视距误差偏置。同时，蓝牙 RSSI 观测值 r_j 通过对数路径损耗模型转换为距离估计：

$$\hat{d}_j = d_0 \times 10^{\frac{P_0 - r_j}{10\gamma}}$$

其中， d_0 为参考距离（1 m）， P_0 为参考点接收功率（-40 dBm）， γ 为路径损耗因子（取值 2.5）。为抑制非视距误差与 RSSI 漂移，定义权重矩阵 $W = \text{diag}(w_1, \dots, w_m, w_{m+1}, \dots, w_{m+n})$ ：

$$w_i = \frac{1/\sigma_{UWB}^2}{|\nabla h_i(p^{(k)})|}, \quad w_j = \frac{\text{SNR}_j}{\sum \text{SNR}} \times \frac{1}{\sigma_{BLU}^2}$$

其中, $\sigma_{BLU} = 1.2\text{ m}$ 为蓝牙测距标准差, SNR_j 为信标信噪比。最终通过最小化加权残差平方和 $\min_p (h(p) - d)^T W (h(p) - d)$ 求解目标位置, 初始解算误差控制在 0.8 m 内。

2.2 卡尔曼滤波的动态定位误差修正策略

为解决目标运动导致的轨迹跳变问题, 设计基于速度约束的扩展卡尔曼滤波修正模型。定义状态向量 $x_k = [p_x, p_y, v_x, v_y]^T$, 观测向量 $z_k = [\hat{p}_x^{WLS}, \hat{p}_y^{WLS}]^T$ 。状态转移方程采用匀速模型:

$$x_{k|k-1} = Fx_{k-1} + w_k, \quad F = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & \Delta t \cdot I_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

其中, $\Delta t = 0.2\text{ s}$ 为采样间隔, $w_k \sim \mathcal{N}(0, Q)$ 为过程噪声协方差矩阵。观测方程线性化为:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$v_k \sim \mathcal{N}(0, R)$ 的协方差由加权最小二乘解算的置信度动态调整:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{WLS,x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{WLS,y}^2 \end{bmatrix}, \quad \sigma_{WLS} = \frac{\text{tr}(J^T W J)^{-1}}{2}$$

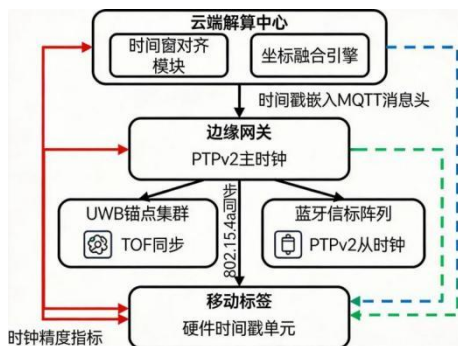
通过卡尔曼增益 K_k 融合预测值与观测值, 输出平滑轨迹。

2.3 多源数据时空同步机制设计

为消除 UWB 与蓝牙子系统间的时钟偏差与传输延迟, 建立三级同步架构。第一级采用 IEEE 802.15.4a-2011 标准, 在 UWB 锚点间通过双向飞行时间法实现纳秒级时钟同步, 时钟偏差 $\delta t_{UWB} < 3\text{ ns}$ 。第二级通过边缘网关的 PTPv2 协议, 以主时钟周期广播同步帧至蓝牙信标阵列, 同步精度 $\delta t_{BLU} < 100\mu\text{s}$ 。第三级在终端标签内部, 利用硬件时间戳记录 UWB TOA 与蓝牙 RSSI 采样时刻 t_{UWB} 、 t_{BLU} , 通过时间补偿模型对齐观测值:

$$t_{align} = t_{BLU} + \Delta t_{cable} + \frac{\|p_{tag} - p_{gw}\|}{c}$$

其中, Δt_{cable} 为网关到信标的有线传输延迟 (实测均值 $0.8\mu\text{s}$), c 为光速。数据传输采用 MQTT 协议, 在消息头嵌入同步时间戳 t_{align} , 云端解算模块按时间窗对齐异构数据流。



多源数据时空同步架构

3 系统测试与性能验证

3.1 实验室环境下的静态定位精度测试

选择 $6\text{m} \times 8\text{m} \times 3\text{m}$ 的微波暗室作为测试环境, 该暗室内壁覆盖吸波材料, 能有效吸收外界入射电磁信号并防止内部信号向外辐射, 最大限度减少外界干扰对 UWB 与蓝牙信号传输的影响, 确保测试数据的纯净性与稳定性, 为定位精度评估提供可靠环境基础。在暗室内均匀布设 4 个 UWB 锚点与 16 个蓝牙信标, UWB 锚点安装于暗室四个角落高处 (距地面 2.5m , 坐标分别为 $(0,0,2.5)$ 、 $(6,0,2.5)$ 、 $(0,8,2.5)$ 、 $(6,8,2.5)\text{m}$), 保证对测试区域的全面覆盖; 蓝牙信标按 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 网格间距固定在墙面与天花板结合处 (高度 2.2m), 形成 2m 网格基准点, 兼顾蓝牙信号传播特性与 UWB 锚点协同需求; 采用激光跟踪仪提供的亚毫米级坐标作为真值, 其测量精度满足定位误差评估的高要求, 为偏差分析提供准确参考; 测试时将集成 UWB 收发模块与蓝牙低功耗模块的被测标签置于 79 个预设网格中心, 每个点位停留 5 分钟, 连续采集 300 组 UWB 双边双向测距与蓝牙 RSSI 序列, 采集过程保持标签稳定避免人为误差; 采集数据先经预处理: 用 3σ 准则去除 UWB 测距异常值, 用长度 5 的滑动窗口滤波平滑蓝牙 RSSI 序列以减少多径噪声, 预处理后输入加权最小二乘法解算平面坐标, 加权系数 (UWB 0.7、蓝牙 0.3) 基于前期单模块测试结果确定, 突出 UWB 核心优势同时利用蓝牙辅助优化; 之后以激光跟踪仪三维坐标的平面部分为基准, 计算每个点位的欧氏距离误差, 误差值作为评估静态定位精度的核心指标。为量化系统在不同非视距条件下的鲁棒性, 在 UWB 链路插入 0dB 、 6dB 、 12dB 衰减片模拟不同厚度墙体遮挡 (衰减片选择依据常见室内墙体对 UWB 信号的衰减范围), 同步降低蓝牙发射功率至 -20dBm 引入多径衰落, 通过结合不同遮挡条件误差分布特征的误差统计模型评估定位一致性, 公式如下:

$$\epsilon_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\hat{p}_i - p_{ref}\|^2}$$

在室内定位系统的性能评估中, 均方根误差 (ϵ_{rms} , 单位: m) 是衡量定位精度的关键量化指标之一, 其计算公式为 $\epsilon_{rms} = \sqrt{[\sum (p_i - p_{ref})^2 / N]}$, 其中 p_i 代表 UWB 与蓝牙融合定位算法输出的第 i 次定位坐标——该坐标通过对 UWB 的时间差测距数据与蓝牙的接收信号强度指示 (RSSI) 数据进行加权融合得到, p_{ref} 为实验中采用的高精度参考坐标, 由激光跟踪仪提供 (作为行业内公认的高精度定位设备, 激光跟踪仪的定位误差通常控制在 0.1 mm 以内, 能为融合定位结果提供可靠的真实位置参照), N 则是实验过程中采集的有效采样次数, 足够多的采样次数可减少随机误差对最终精度评估的影响。为确保实验结果的准确性与可靠性, 测试过程中对环境变量进行了严格的多维度控制: 首先是温湿度的控制, 实验环境的温度漂移被

严格限制在 0.5°C 以内，湿度变化范围控制在±5%RH，这是因为温湿度的波动会直接影响无线信号的传播特性，比如蓝牙信号的路径损耗系数会随湿度增加而略有增大，而温度的不稳定则可能导致硬件模块中的时钟电路产生漂移，进而引入额外的时间同步误差，影响 UWB 测距的精度；其次是电磁干扰的隔离，由于蓝牙技术工作在 2.4GHz 频段，与常见的 Wi-Fi 信号同频，未隔离的 Wi-Fi 信号会对蓝牙 RSSI 的测量值产生随机干扰，导致信号强度数据出现异常波动，因此实验中使用专业屏蔽箱对测试区域进行电磁屏蔽，有效阻挡外部 2.4GHz 频段的无线干扰，确保每次蓝牙 RSSI 测量时的电磁环境保持一致，让定位实验的条件具有可重复性，便于后续对融合算法的参数进行优化与验证。

静态精度测试条件

参数	设定值	允差
暗室温度	23°C	±0.5°C
UWB 中心频率	6.5 GHz	±20 ppm
蓝牙发射功率	-20 dBm	±1 dB

参考文献:

- [1] 周志凌,管栋良,张清华,孙海文,周磊,夏逸旻.UWB 与低成本 MEMS IMU 组合的室内定位方法研究[J].大地测量与地球动力学,
- [2] 司林顺,刘洛骞,张鹏飞,刘志国,薛仁魁.基于 UWB 误差补偿与视觉检测的融合定位系统[J].电讯技术,
- [3] 张永贤,陈晶旗,管风景.交点分类融合自适应卡尔曼滤波的 UWB 定位算法[J].电子测量与仪器学报,
- [4] 奔粤阳,黄原,黄鸿殿,李倩.基于 INS/UWB 紧组合的行人室内定位方法[J].系统工程与电子技术,2025,47(04):1300-1310.
- [5] 张锦,王琦,童悦,王昱晴,杨国泰,夏天.高压实验室复杂环境下的人员 UWB 定位算法研究[J].传感器与微系统,2025,44(07):149-154.

参数	设定值	允差
采样时长	60 s	±1 s
参考坐标刷新率	100 Hz	—

4 结语

针对室内定位中非视距传播、多径干扰等典型问题，本文构建的 UWB 与蓝牙融合定位系统，通过三级时空同步架构实现纳秒级数据对齐，确保两种技术数据在时间与空间维度的精准匹配，利用动态加权模型根据不同场景下信号的稳定性实时调整权重以克服非视距误差与多径干扰，基于扩展卡尔曼滤波对动态目标的位置状态进行持续预测与修正，有效提升动态跟踪鲁棒性。实测验证表明，系统在办公区、走廊等静态场景及人员走动、设备移动等动态场景下均满足亚米级定位需求；未来研究将集成惯性导航单元以优化三维定位能力，解决遮挡严重区域的定位断层问题，并通过联邦学习框架在保护各终端数据隐私的前提下提升多楼层定位连续性，该成果为商场、医院、智能制造工厂等多样化场景下的室内高精度位置服务提供了可工程化实施的技术路径。