

基于UWB定位的全自动无人驾驶列车休眠唤醒系统研究

吴 亮

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100070

摘 要：本文针对传统应答器方案在全自动无人驾驶（FAO）列车车库休眠唤醒中存在的停车精度要求高、成本高及休眠后失联等问题，提出了一种基于超宽带（UWB）定位技术的新型解决方案。该系统通过在车库部署UWB基站、在列车安装标签，实现了对列车厘米级精度的连续定位，并融合UWB数据与车载ATP（列车超速防护）系统定位信息，经协同校正生成可靠位置。该系统可在休眠后持续监控列车位置，显著降低成本、提升系统可靠性及监控能力，为FAO列车库内智能化运维提供了新的路径。

关键词：全自动无人驾驶（FAO）；休眠唤醒；超宽带（UWB）定位

1 引言

随着城市轨道交通向着智能化、网络化方向飞速发展，全自动无人驾驶（FAO）技术已成为行业前沿与标杆。中国作为主要市场，北京地铁燕房线、西安10号线等多条线路已实现GoA4等级全自动运行。FAO系统实现了列车运行、休眠、唤醒、清洗等全过程的高度自动化，极大提升了运营效率与可靠性。其中，列车结束运营后驶回车库的“休眠”流程，以及次日投入运营前的“唤醒”流程，是确保FAO系统安全、高效运转的关键环节。

在现有技术中，列车休眠唤醒功能的实现依赖轨旁应答器。具体而言，需在车库内特定停车位置部署专用的“休眠唤醒应答器”，并要求列车停车时，其两端的应答器接收模块（BTM）天线必须精确停位于该应答器的辐射范围内。车载设备通过读取应答器报文中所包含的位置信息，完成列车定位的初始化，进而与地面控制中心建立通信，执行后续的静态、动态测试，最终获得授权投入运营。然而，这一传统方案存在诸多固有缺陷：

停车精度要求苛刻：列车休眠停车必须保持极高的纵向停车精度（通常需控制在 ± 0.5 米以内），以确保BTM天线能成功接收应答器信号。这对自动驾驶算法的控制精度和可靠性提出了较高要求，任何微小偏差都可能导致唤醒失败，需人工介入，降低了运营效率。

设备成本与工程复杂度高：为补偿停车误差，工程上往往需采用“长应答器”来扩大辐射范围，此类特殊应答器成本较高，且提高了对线路设计的要求，导致实用性差。通常，一条库线需布置多个精确校位应答器及休眠唤醒应答器，进一步推高了工程总成本。

休眠后失去监控：列车一旦休眠，车载ATP设备立即

断电，与控制中心（ATS）的通信链路随之中断。若因夜间检修、调车、清洗等作业需要移动列车，ATS系统无法获知列车的最新位置，形成“信息盲区”，存在潜在的安全与管理风险。

超宽带（Ultra-Wide Band, UWB）技术是一种新兴的无线载波通信技术，因其纳秒级的极窄脉冲而具有高时间分辨率、强抗多径干扰能力、高定位精度^[1]（可达厘米级）、低功耗等突出优点，被广泛认为是室内及封闭环境下的最优定位技术方案之一。其定位原理主要是通过基站与标签之间交换无线信号，测量飞行时间（Time of Flight, ToF）、到达时间差（Time Difference of Arrival, TDoA）等参数，精确计算两者之间的距离，再通过多边定位算法解算出标签的精确坐标。鉴于UWB技术的上述优势，本文提出一种基于UWB定位的休眠唤醒新装置与新方法，旨在彻底解决传统应答器方案的痛点。本研究的主要内容如下：

- 设计了一套完整的、基于UWB的库内列车定位与休眠唤醒系统架构。
- 提出了一种融合UWB原始数据与车载ATP定位信息的协同校正算法，确保了定位信息的可靠性与连续性。
- 定义了基于UWB定位的列车全自动休眠与唤醒新流程，实现了休眠后列车位置的持续监控与唤醒时的高可靠性校验。
- 分析了该方案对比传统方案的优势，为FAO系统的优化设计提供了新的思路。

2 系统总体架构设计

本章节将详细阐述基于UWB定位的休眠唤醒系统的整体架构，该系统主要由场地层、车载层、处理层三个部分构成，其总体架构如图1所示。

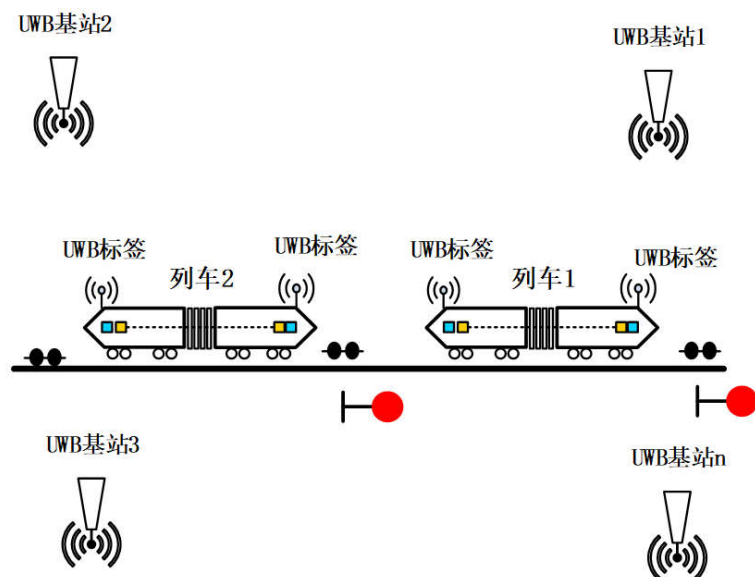


图1 系统总体架构图

2.1 场地层：UWB基站网络

场地层是系统获取原始数据的物理基础。在列车车库的停车区域、咽喉区、出入库线等需要精确定位的范围内，需根据覆盖面积、定位精度要求和环境特点进行严格的基站网络规划。基站通常采用均匀网格状或正四面体布局，安装于车库两侧墙壁或立柱上，高度通常在3-5米，以尽量减少遮挡和非视距（NLoS）传播^[2]。基站通过有线以太网或工业无线网互联，并通过精密时钟同步协议实现时间同步。基站负责与车载标签进行通信，测量无线信号传输的飞行时间（ToF）或到达时间差（TDoA）等原始参数。

2.2 车载层：UWB标签与车载ATP

每列FAO列车在车头、车尾（或中部）的顶部或侧面关键位置安装有高精度UWB主动标签。标签周期性地与场内所有在通信范围内的UWB基站进行信令交互，广播信号或响应请求，为后台定位计算提供原始的测量数据。此外，列车原有的车载ATP设备是本系统的重要数据源和交互对象。此外，车载ATP提供的基于测速传感器、雷达、应答器等多传感器融合的列车定位信息，将被用于对UWB定位结果进行校正和融合。

2.3 处理层：休眠唤醒装置

处理层是系统的“大脑”，核心设备为休眠唤醒装置。该装置部署于列车上，24小时不断电并与ATS保持通信，定期向ATS报告列车位置。其主要功能包括：

定位解算：接收来自所有UWB基站的原始测量数据，运行定位算法（如最小二乘法、卡尔曼滤波等），解算出每个车载标签的实时二维或三维坐标。

坐标转换：将解算出的UWB局部坐标系下的坐标（以某个基站为原点），通过预设的转换参数，转换为车载信号系统电子地图线路坐标系下的绝对坐标。

数据融合与校正：实时接收来自车载ATP的列车定位信息。由于ATP定位信息在列车休眠前具有极高的可靠性，系统利用此信息对UWB的定位结果进行在线标定和校正，消除UWB系统自身的累积误差和环境干扰。

通信功能：与ATS系统保持持续通信，上报列车实时位置状态；同时，在唤醒时与车载ATP建立通信，为其提供初始位置信息。

3 系统工作原理与关键技术

3.1 高精度定位与坐标转换算法

UWB定位的核心是测距。本系统采用双面双向测距（Double-Sided Two-Way Ranging, DS-TWR）法^[3]，该方法通过多次信号交换来计算飞行时间，有效地抵消了时钟偏移带来的误差，无需严格的时钟同步，精度更高。距离计算公式如下：

$$d = c * \frac{\text{Tround1} * \text{Tround2} - \text{Treply1} * \text{Treply2}}{\text{Tround1} + \text{Tround2} + \text{Treply1} + \text{Treply2}}$$

其中， c 为光速，Tround1, Tround2, Treply1, Treply2为测量所得的时间间隔。

获取到标签到至少三个（二维定位）或四个（三维定位）基站的距离后，即可通过最大似然估计或最小二乘法，解算出标签在UWB局部坐标系中的位置(x_{uwb} , y_{uwb} , z_{uwb})。关键的坐标转换步骤通过布尔沙-沃尔夫（Bursa-Wolf）模型实现。系统需在部署阶段，通过全站仪等精密测量仪器，精确测量至少三个UWB基站的世

界坐标。利用这些公共点对,最小二乘法平差计算出一组最优的转换参数(包括平移、旋转、缩放参数)。此后,所有UWB标签的局部坐标均可通过此参数集实时转换为世界坐标(X, Y, Z)。最终,根据世界坐标,转为电子地图线路坐标系下的绝对坐标。

3.2 数据融合与协同校正机制

单一UWB定位在复杂车库环境中可能因多径效应、非视距(NLoS)传播^[4]等因素出现跳变或漂移。而车载ATP在休眠前基于应答器和测速传感器的定位在短时内非常精确,但会累积误差。

本系统设计了一种基于卡尔曼滤波(Kalman Filter)的数据融合算法。将UWB解算出的坐标与ATP上报的列车位置、速度信息作为观测量,建立系统状态方程(列车运动模型)和观测方程。卡尔曼滤波器通过预测和更新两个步骤,最优地融合两类数据,输出一个更加平滑、准确且可靠的列车位置估计值。此过程不仅抑制了UWB的测量噪声,更关键的是,利用ATP的高精度短期定位能力,对UWB系统的系统误差(如由坐标转换参数微小偏差引起的误差)进行了在线校正和补偿,确保了整个系统输出结果的长期可靠性。

3.3 休眠与唤醒流程

3.3.1 列车休眠流程

当列车进入车库时,车载UWB标签与UWB基站建立通信,完成位置测量。休眠唤醒装置接收车载UWB标签的位置信息后,经过坐标转换算法处理,转化为车载ATP列车定位坐标。同时,休眠唤醒装置实时接收车载ATP的位置信息,并利用该信息对自身计算的列车位置信息进行校正,以获得更准确的列车位置。当列车停在停车轨完成休眠后,车载ATP将断电,休眠唤醒装置保持上电并维持与ATS的通信,继续将列车位置发送至ATS。ATS根据休眠唤醒装置发送的列车位置信息继续监控列车,彻底解决了“休眠失联”问题。

3.3.2 列车唤醒流程

休眠唤醒装置收到ATS的远程唤醒命令后,给车载ATP设备上电。车载ATP完成上电后与休眠唤醒装置建立通信,并获取休眠唤醒装置的列车位置信息,并利用该信息与自身存储的列车位置信息进行校验,若两个位置的差异在预设的安全阈值内(如 ± 1 米),则认为列车未被移动或移动在允许范围内。ATP将此UWB位置作为初始化基准,完成定位初始化,并继续执行后续的静态、动态测试等唤醒流程;若位置差异超出阈值,则表明列车在休眠期间被意外移动到了另一个可能不安全的未知位置。ATP将判定唤醒条件不满足,唤醒流程中止,并向

ATS报告唤醒失败及错误原因,请求人工介入检查。这一校验机制极大地提升了唤醒过程的安全性和可靠性。

4 应用优势与分析

与传统应答器方案相比,本系统具有以下显著优势:

显著降低工程成本与复杂度:无需在库线全线铺设大量精确校位和长型休眠唤醒应答器,只需部署UWB基站网络。基站布设灵活,一套基站网络可覆盖多条股道,大大降低了设备采购、安装和维护成本,简化了线路设计。

彻底解放停车精度约束:列车休眠停车不再需要苛刻地对准特定应答器,只需停靠在UWB网络覆盖区域内即可,降低了自动停车算法的难度,提高了操作灵活性。

实现休眠期全程无缝监控:解决了FAO领域长期存在的“休眠盲区”难题。ATS可7x24小时监控库内所有列车实时位置,对于调车、检修、安全防护等管理活动具有重大价值。

提升系统安全性与可靠性:唤醒时的位置校验机制引入了新的安全层能有效防止因列车被意外移动后盲目唤醒可能带来的风险。

具有良好的扩展性:UWB基础设施不仅可以用于休眠唤醒,还可用于车库内人员定位、设备追踪、防撞预警等扩展应用,实现“一网多用”,进一步提升车库智能化管理水平。

5 结论

本文深入研究并提出了一种基于UWB高精度定位技术的全自动无人驾驶列车车库休眠唤醒系统。该系统通过构建UWB定位网络,并创新性地设计与车载ATP定位信息融合校正的算法,实现了对库内列车的连续、厘米级精度的实时定位。该系统可成功解决传统应答器方案存在的停车精度要求高、成本高、休眠后失去监控等核心痛点。该系统不仅技术可行,而且在提升安全性、可靠性、经济性和智能化水平方面效益显著,具有极高的推广价值。

参考文献

- [1]许勇,邵浩东. UWB地铁轨道巡检车定位系统设计[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 138-145.
- [2]胡文龙,周宇飞,宋全军,曹平国. 基于UWB和IMU信息融合的室内定位算法研究[J]. 制造业自动化, 2023(2): 193-197.
- [3]李阳,付克昌,漆军,熊皓. 一种非视距下基于UWB的定位数据校正方法[J]. 电脑知识与技术, 2023(4): 9-12.
- [4]袁勤政,吴晓,陈沛宇. 基于三球定位原理的改进UWB定位方法[J]. 武汉纺织大学学报, 2023(3): 52-55.