

[交通信号灯]

基于UWB基站定位的交通信号灯智能控制

文/汪锦阜 邓江 刘洋 贾焱森 侯豹
国电建投内蒙古能源有限公司

随着无线通信技术的发展，超宽带（UWB）定位技术因其高准确度和低延迟特性而被认为是优化交通信号控制的有力工具。提出一种基于UWB基站定位的交通信号灯智能控制系统，该系统集成信号控制的总体架构设计、实时定位数据的采集方法、数据处理与交通流量分析以及自适应信号控制算法的应用。通过技术应用测试，验证所提系统在提升交通流动性和降低交通延时方面的有效性，展示UWB技术在现代交通信号控制中的实际应用价值和潜力。

随着城市化进程的加快和车辆数量的持续增加，城市道路交通系统的运行压力急剧上升，交通信号灯智能控制技术已成为提高交通效率、减少拥堵和降低碳排放的重要手段。近年来，超宽带（Ultra-Wideband, UWB）定位技术因其高准确度、低功耗和低延迟的特点，在智能交通控制系统中展现出显著的应用潜力。UWB基站通过精准的定位数据可以实时反映道路上的交通流量、车辆速度以及行人分布信息，这对于实现交通信号灯灯的自适应控制、提高道路通行能力和减少车辆等待时间具有重要意义。

UWB基站定位技术原理

UWB技术是一种以短脉冲信号为基础的无线通信技术，其频率范围宽广，能够在极低功率下传输高精度的位置信息。在交通信号灯智能控制中，UWB基站定位技术通过安装在路口及周围环境中的多个基站，实时跟踪和定位经过的车辆或行人。UWB的优势在于其高时间分辨率和较强的抗干扰能

力，使得定位准确度可以达到厘米级，尤其适用于高密度的交通环境中。

UWB基站定位主要基于到达时间差（TDOA）和往返时间（RTT）原理来进行定位。在TDOA定位中，多个UWB基站同时接收从目标（如车辆）发射的信号，通过计算信号到达各基站的时间差，利用三角测量法来确定目标的位置。RTT则通过发送和接收信号的往返时间来计算目标与基站的距离。为确保定位准确度，系统需要至少三个基站提供足够的空间信息，用以确定目标的具体位置。

UWB技术的定位准确度受多个因素影响，包括基站的布设、信号传播环境（如障碍物、天气等）以及系统的算法准确度。在实际应用中，UWB技术与传统的交通流量监测手段（如地磁、视频监控）结合，可以实现更精准的交通信号调控。通过实时获取车辆的位置、速度和流量信息，系统能够动态调整交通信号灯的周期和时长，以优化交通流畅度并减少交通拥堵。UWB基站定位技术原理如图1所示。

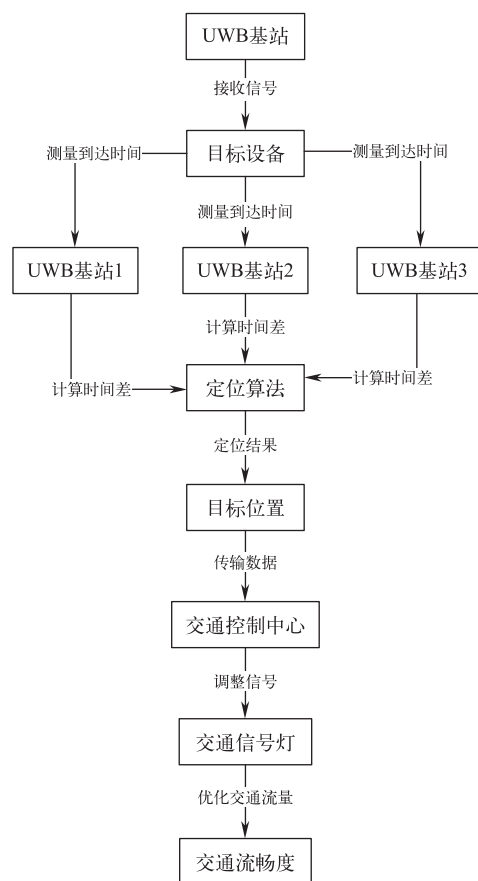


图1 UWB基站定位技术原理

基于UWB的交通信号灯智能控制系统设计

1. 信号控制系统的总体架构设计

在基于UWB基站定位的交通信号灯智能控制系统的总体架构设计中，系统采用分层次的设计方法，以确保高效的数据处理与实时的信号控制能力。顶层设计包括中央控制中心，集成交通管理软件平台，负责接收来自各UWB基站的实时数据，并进行分析处理，生成控制指令，随后被传输至各个交通信号节点。中心控制平台配备有高性能的数据处理服务器，支持复杂的算法运行，如车流预测模型、优化算法和事故响应机制，确保信号控制策略的实时更新与执行的精确性。每个交通节点由一个信号控制器和多个UWB接收器组成，信号控制器接收中央控制中心的指令，并根据局部交通数据做出调整，优化信号灯的切换时机，以适应实时交通流变化，UWB接收器则负责持续监测并上报车辆的精确位置信息。此外，系统架构还特别设计冗余机制和故障恢复策略，以保障系统在关键组件失效时能够迅速恢复功能，维持交通信号的连续性和可靠性。系统还嵌入先进的通信网络，包括无线和有线网络，确保数据传输的高速与安全，以及系统各层之间的高效通信^[3]。系统架构设计如图2所示。

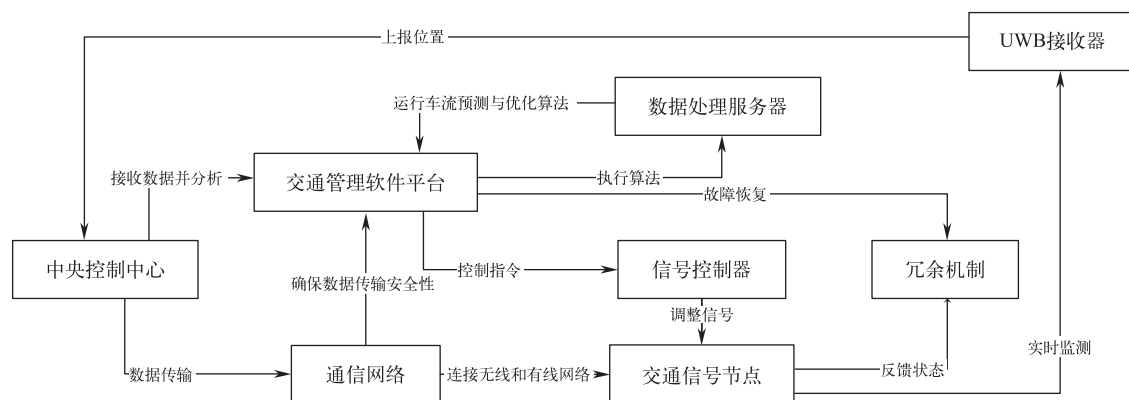


图2 系统架构设计

2. UWB基站部署

合理的基站布置不仅能提高车辆定位的准确度，还能保证交通流的实时监控和信号灯的高效调控。UWB基站部署考虑多个技术因素，如基站数量、布设位置、通信范围、信号传播模型以及系统冗余机制等，见表1。

(1) 基站数量选择

UWB技术的定位准确度在理想条件下可达到

表1 基站部署技术参数

参数	设计数值	备注
基站数量	每个交通节点至少3个基站	复杂路口或交通密集区可增加至5~6个基站
基站间距	最小30 m，常规50~100 m	基于城市环境、建筑物和交通流量调整
信号传播范围	50~200 m	受城市环境、障碍物影响
基站刷新频率	10~50 Hz	高速交通流需提高频率
冗余机制	双备份方案	保障系统稳定性
信号强度	需满足最大传输距离要求	根据环境调整发射功率
定位准确度	10~30 cm	受环境干扰、障碍物影响

10~30 cm,但在实际应用中,信号衰减、障碍物反射等因素会影响定位准确度。因此,为确保交通节点的高准确度定位,通常每个交通节点至少需要部署3个基站,这三个基站分别位于交通节点的不同方位。根据实际地理环境和交通流量的需求,基站数量可适当增加。例如,在交通密集区域或复杂路口,可以考虑增加至5个或6个基站,以确保各个路段和车道都能得到充分的覆盖。

(2) 基站布设位置

UWB信号的传播受障碍物影响较大,因此基站布设位置需要尽量避免信号传输的死角或遮挡区域。在交叉路口或大型交通枢纽,基站应尽量布设在交叉点的四个角落或天桥、立交桥的高处,确保信号能够覆盖每一个车道。在布设时,基站应根据道路拓扑和交通流向合理配置,避免信号覆盖过度重叠或覆盖盲区。例如,设置基站时应考虑到交通流的实际方向,如右转、左转车道的特殊需求,确保这些车道的车辆也能被精确定位。部署时还需考虑到基站间的信号干扰问题,避免信号冲突影响定位效果。

(3) 通信范围和信号强度

UWB信号的传播特性要求基站的通信范围通常为50~200 m。实际的通信距离受到建筑物、路面材质以及气候条件的影响,尤其是在城市环境中,高楼大厦和密集的交通设施可能会导致信号衰减。因此,部署时需要考虑基站之间的距离以及中继节点的设置。在常规的城市环境中,基站之间的最小间隔通常为30 m,这一距离可以平衡系统成本和信号覆盖范围。在信号较为复杂的区域,如隧道、地下停车场等,需要额外的信号增强装置或布设更密集的基站。

(4) 信号处理能力

对于快速流动的交通,基站的刷新频率需要提高,以便实现车辆位置的实时跟踪。一般来说,基站的刷新频率应在10~50 Hz之间,高流量地区需要更高频率的数据采集和处理能力。系统还需具备高效的定位算法,确保在多车辆、高速行驶的情况下,定位准确度不受影响。

(5) 冗余机制

为确保系统的可靠性和稳定性,基站部署必须考虑到故障恢复和系统冗余。当某个基站发生故障或维护时,其他基站应能快速接管并保持系统的正常运行。在设计时,可以采用双备份方案,即在每

个交通节点布设至少两个备用基站,当主基站出现故障时,备用基站能自动接管定位任务,不仅能确保交通信号灯的实时调控,也能降低因单点故障带来的交通影响。

3. 实时定位数据的采集方法

在基于UWB基站定位的交通信号指示灯智能控制系统中,实时定位数据的采集是整个系统运行的基础。采集方法依赖于部署在关键交通节点的UWB基站,通过发送和接收超宽带信号,实现对过往车辆的精确定位。每个UWB基站都配备有高灵敏度的接收器,能够捕捉到车辆携带的UWB标签发出的信号,包含了关于车辆位置的时间戳和距离信息。通过高速数据处理单元,基站实时处理这些信息,计算出车辆的精确坐标,并将数据实时上传到中央控制系统。为确保数据的准确性和传输的实时性,系统采用先进的数据同步技术,保证从多个基站收集的数据时间上的一致性和空间上的准确对应。系统中还引入数据滤波算法,如卡尔曼滤波器,以消除环境噪声对信号的影响,提高定位数据的准确度。定位数据的采集示例见表2。

表2 UWB基站实时车辆定位数据示例

时间戳	车辆标识	基站编号	X坐标	Y坐标	信号强度/dBm
08:00:01.123	A123	1	102.4	203.5	-42
08:00:01.456	B456	2	98.7	205.2	-40
08:00:01.789	C789	3	105.6	200.1	-39
08:00:02.012	A123	2	103.2	204.1	-41
08:00:02.234	B456	1	99.1	206.3	-38
08:00:02.567	C789	1	104.5	199.5	-37
...	...	...	...	...	...

表2不仅展示了UWB基站在不同时间点捕捉车辆位置的能力,还体现系统设计的重要考量,即如何通过多点数据融合来提高定位的准确性和系统的可靠性。

4. 数据处理与交通流量分析

在基于UWB的交通信号灯智能控制系统设计中,数据处理与交通流量分析是核心部分,涉及到实时监测和控制的精确执行。实时数据流从UWB基站采集而来,经过预处理以滤除噪声和异常值。以下是针对实时交通数据处理和分析的关键算法步骤及其数学表达式^[4]。

交通数据流处理的第一步是车辆检测,使用

UWB信号的时间差定位技术 (TDOA) 来确定车辆的精确位置 $x_i(t)$ 和 $y_i(t)$, 其中 i 表示车辆索引, t 表示采集时间, 计算公式为

$$\text{TDOA}_i(t) = (x_i(t) - x_{\text{base}})^2 + (y_i(t) - y_{\text{base}})^2 / c \quad (1)$$

式中, x_{base} 和 y_{base} 为基站的坐标; c 为信号传播速度。

通过TDOA计算得到的位置信息可以实时更新到交通信号控制系统中。

接下来, 车辆流量 $F(t)$ 是根据以下积分公式计算得到, 它反映了特定时间段内通过某一点的车辆数, 计算公式为

$$F(t) = \int_{t_0}^t \delta(x_i(\tau), y_i(\tau)) d\tau \quad (2)$$

式中, δ 为关于车辆位置的狄拉克函数, 表示在 t 时间内车辆通过检测点的准确计数。

为分析和优化交通流, 采用车流密度分析方法, 该方法基于车辆速度 $v_i(t)$ 和车辆间距 $s_i(t)$ 计算车流密度 $k(t)$, 计算公式为

$$k(t) = \frac{1}{s(t)} \quad (3)$$

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (4)$$

式中, $\bar{s}(t)$ 为平均车辆间距。

通过实时更新的车流密度数据, 交通信号系统可以调整信号灯的绿灯时间以匹配交通流需求。

为实现这一目标, 采用一种基于车流密度的信号调整算法。算法根据车流密度与预定阈值进行比较, 决定是否延长交通灯的绿灯时间, 计算公式为

$$t_{\text{green}}(\text{new}) = t_{\text{green}}(\text{old}) + \alpha(k(t) - k_{\text{threshold}}) \quad (5)$$

式中, $t_{\text{green}}(\text{new})$ 和 $t_{\text{green}}(\text{old})$ 分别为调整后和调整前的绿灯时间; α 为调整系数; $k_{\text{threshold}}$ 为车流密度阈值。

5. 自适应信号控制算法的应用

在基于UWB基站定位的交通信号灯智能控制系统中, 自适应信号控制算法的应用旨在通过实时数据动态调整交通信号, 以优化交通流并减少拥堵。此算法采用一种反馈控制机制, 其核心思想是通过持续监测交通状况并实时调整信号灯周期, 来适应不断变化的交通需求。

定义交通流量 $q(t)$ 为特定时间 t 的通过车辆数, 可以通过UWB基站的实时数据精确获得。车辆流量与信号灯的状态直接相关, 其计算公式为

$$q(t) = \rho(t)v(t) \quad (6)$$

式中, $\rho(t)$ 为车辆密度; $v(t)$ 为车辆的平均速度, 这两个变量均由UWB系统实时提供。

进一步, 信号灯的周期调整算法可以表示为

$$T_{\text{green}}(t+1) = T_{\text{green}}(t) + K_p(q_{\text{des}} - q(t)) \quad (7)$$

$$T_{\text{red}}(t+1) = T_{\text{cycle}} - T_{\text{green}}(t+1) \quad (8)$$

式中, $T_{\text{green}}(t)$ 和 $T_{\text{red}}(t)$ 分别为在时间 t 的绿灯和红灯持续时间; K_p 为比例控制增益; q_{des} 为期望的车流量; T_{cycle} 为信号周期的总时长。

该自适应算法通过减少或增加绿灯时间以响应实时车流的变化, K_p 的选择关键在于调整灵敏度, 确保交通流的平滑过渡而非频繁跳变, 这样既保持了交通流的连续性, 也减少了等待时间和交通拥堵。

此外, 为进一步细化控制策略, 考虑到不同时间段和不同方向的车流量差异, 引入方向权重因子 ω_d , 对不同方向的绿灯时间进行差异化调整

$$T_{\text{green},d}(t+1) = T_{\text{green}}(t+1)\omega_d \quad (9)$$

式中, d 为不同的交通方向; ω_d 为基于历史数据和交通预测模型确定的权重, 反映了各方向的交通流优先级。

技术应用测试

在本次实验中, 所使用的数据集是由测试团队通过在模拟城市路网的环境中进行一周时间的连续运行收集, 确保数据覆盖各种交通和信号灯状态变化情况, 同时通过高频采样保持数据的实时性和高准确度。数据的采集和处理均在控制中心服务器完成, 数据每秒更新一次, 涵盖了详尽的车辆位置、速度及信号状态等信息。所有收集到的数据完全用于系统功能的测试, 没有将数据用于任何模型的训练^[5]。具体到数据量, 整个实验共收集超过604 800条数据记录, 这一数量基于每辆车每秒产生一条数据, 每个信号灯也同步生成状态数据, 且实验持续一周的时间。每条数据包含以下内容: 时间戳(精确到秒), 车辆的具体位置(X 和 Y 坐标), 车速(km/h), 以及对应的信号灯状态及其持续时间。整个测试周期内, 总共进行了五次完整的测试循环。测试的主要指标包括信号灯响应时间、交通流量处理效率和数据准确性。信号灯响应时间指的是从检测到交通需求变化到信号灯实际执行变更所需的时间; 交通流量处理效率反映在绿灯期间通过交叉口的车辆数量, 是衡量信号调整效果的直接指标; 数据准确性则

是评估从UWB基站到系统中心处理的数据准确记录与实际车辆位置偏差的指标，关键在于验证系统对实时数据处理的准确度。测试数据见表3。

表3 测试数据

测试周期	信号响应时间/s	交通处理效率 (车辆数)	数据准确性 (%)
周期 1	1.47	85	99.87
周期 2	1.32	88	99.93
周期 3	1.29	90	99.90
周期 4	1.25	87	99.88
周期 5	1.30	89	99.91

从表3可以看出，信号响应时间在1.25~1.47 s之间，显示出系统能够快速地对交通需求变化做出响应。交通流量处理效率的测试结果表明，系统可以有效地在绿灯期间处理大量的车辆流，从而减少交通拥堵。数据准确性普遍高于99.85%，证明了UWB基站数据的高度准确性和系统对这些数据的有效处理。这些测试结果反映系统在现实条件下的稳定性和效能，特别是在处理高密度交通流和维持信号调整准确度方面表现出色。

结束语

本次研究提出的基于UWB基站定位的交通信号指示灯智能控制系统通过UWB技术实时获取交通流量数据，利用数据融合技术对交通流量信息进行

精准分析，结合智能算法实现交通信号的自适应控制。在此过程中，UWB基站不仅提供高准确度的交通信息定位能力，还支持复杂交通情境下的交通状态评估与预测，为信号灯调控策略的制定提供科学依据。这一系统不仅能够在常规交通状态下优化信号控制效果，还能够在交通高峰期、特殊事件及应急情况下实时调整信号策略，从而实现对动态交通流的有效调控。EA

(收稿日期：2024-11-29)

参考文献

[1] 潘树国, 贾丰硕, 魏建雄, 等. 基于UWB单基站系统/INS紧组合的智能车定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(12): 1196-1202.

[2] 邬志锋, 王贵恩, 钟尚敏. 基于UWB的智能道路照明系统的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2023, 52(1): 166-171.

[3] 李跃伟. 基于UWB和SUB-GHz的双向通信定位基站的实现[J]. 电子质量, 2023(8): 42-45.

[4] 王波. 基于UWB和气压计的自动跟踪定位系统研究[J]. 电子制作, 2023, 31(17): 38-41.

[5] 于新业, 窦文森. 基于UWB信号的单基站定位算法研究及AOA 定位分析[J]. 汽车博览, 2022(28): 156-158.

(上接第120页)

期(60%负荷)数据发现，系统性能衰减并非线性关系：从低峰到平峰阶段，准确率仅下降1.7个百分点，而从平峰到高峰阶段，骤降3.2个百分点。同理，响应时延在前半段增加19 ms，后半段激增23 ms，表明系统在高负荷区间性能劣化更为显著。以上实验数据不仅验证本文所设计系统的实用性，更揭示系统性能与负荷水平之间的定量关系，为实际部署时的负荷管理提供重要参考。

结束语

本文提出的基于物联网的10 kV电气设备故障诊断检测系统，实现对设备运行状态的实时监测和故障的智能诊断。系统通过集成先进的传感器、通信和数据处理技术，有效提高故障诊断的准确性和效率，为保障配电网安全稳定运行提供新的解决方

案。实验结果验证系统在不同负荷水平下的有效性和可靠性。未来研究将进一步优化系统算法，提升其在复杂工况下的适应性和鲁棒性，并探索与其他智能电网技术的融合，构建更加完善的配电网智能化运维体系，例如考虑分布式电源接入对系统的影响，以及研究更高级的故障预测算法等。EA

(收稿日期：2024-11-25)

参考文献

[1] 贾祥林. 光伏发电系统电气设备故障的常见现象与故障处理[J]. 电气时代, 2024(10): 52-55.

[2] 刘嘉伟. 变电站二次设备继电保护回路隐性故障自动检测方法研究[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(10): 90-91, 94.