

# 智能传感器与边缘计算驱动的电商物流实时追踪模块设计

陆宇亮, 冯源

贵州大学省部共建公共大数据国家重点实验室, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年6月24日

## 摘要

针对电商物流场景中货物实时追踪精度不足的问题, 本研究设计一种基于STM32G070微控制器与多模态传感器的智能边缘计算追踪模块。系统集成华大北斗/GPS双模定位、温湿度传感器, 通过硬件层构建定位信息与环境参数的复合感知矩阵。采用卡尔曼滤波算法对多源异构数据进行融合处理, 有效抑制了车载动态环境下的信号噪声干扰, 将定位轨迹的均方根误差降低至1.5米以内。模块依托STM32G070的Cortex-M0+内核实现边缘侧实时数据处理, 开发具有自适应权重调整功能的数据融合框架, 在保持7.2 mA低功耗特性的同时, 完成运动状态识别与环境异常检测的并行计算。研究成果为智能物流提供了具备边缘决策能力的嵌入式解决方案, 有效支持运输过程可视化与供应链数字化升级。

## 关键词

智能物流, 多模态传感器, 卡尔曼滤波, 定位精度优化, 供应链数字化

# Design of a Real-Time Tracking Module for E-Commerce Logistics Driven by Intelligent Sensors and Edge Computing

Yuliang Lu, Yuan Feng

Provincial-Ministry Joint Construction of State Key Laboratory of Public Big Data, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 29<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 24<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To address the insufficient real-time tracking accuracy in e-commerce logistics scenarios, this study develops an intelligent edge computing tracking module based on the STM32G070 microcontroller

文章引用: 陆宇亮, 冯源. 智能传感器与边缘计算驱动的电商物流实时追踪模块设计[J]. 电子商务评论, 2025, 14(6): 2462-2469. DOI: 10.12677/ecl.2025.1462013

and multimodal sensors. The system integrates Huada Beidou/GPS dual-mode positioning and temperature-humidity sensors, constructing a composite perception matrix of positioning information and environmental parameters through hardware-layer integration. A Kalman filtering algorithm is employed to fuse multi-source heterogeneous data, effectively suppressing signal noise interference in vehicular dynamic environments and reducing the root mean square error (RMSE) of positioning trajectories to below 1.5 meters. Leveraging the Cortex-M0+ core of the STM32G070, the module achieves real-time edge-side data processing and implements a data fusion framework with adaptive weight adjustment functionality. This architecture enables parallel computation for motion state recognition and environmental anomaly detection while maintaining low power consumption at 7.2 mA. The developed solution provides an embedded system with edge decision-making capabilities for smart logistics, effectively supporting transportation process visualization and digital supply chain upgrades.

## Keywords

Smart Logistics, Multimodal Sensors, Kalman Filtering, Positioning Accuracy Optimization, Supply Chain Digitization

Copyright © 2025 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

在电子商务迅速发展的时代背景下, 电商物流配送行业作为现代经济体系中的重要支柱, 其核心竞争力不仅体现在供应链管理和客户服务上, 更贯穿于整个运输环节。货物运输作为电商物流配送的关键环节, 直接关系到用户体验和企业运营效率。近年来, 随着物联网技术在电商物流领域的广泛应用, 传统物流模式正在发生深刻变革[1]。

物联网技术通过智能化、数据化的手段, 显著提升了物流运输效率。这一趋势不仅体现在配送速度的优化上, 更反映在整个供应链的可视化和精准化管理中。例如, 基于 RFID 技术的货物追踪系统能够实现实时监控, 确保货物在运输过程中的安全性; 而智能仓储系统则通过数据分析优化库存管理, 大幅度降低了物流成本[2]。

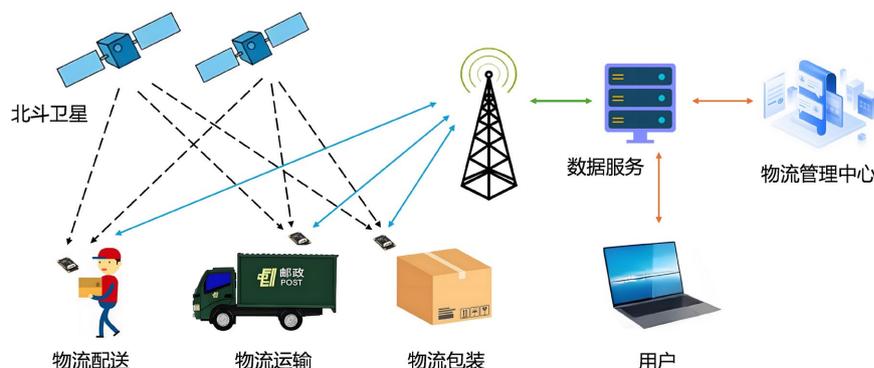


Figure 1. Schematic diagram of the Beidou e-commerce logistics positioning system

图 1. 北斗电商物流定位系统示意图

基于上述背景, 本文设计一种基于北斗高精度定位技术和窄带物联网(NB-IoT)的电商物流实时追踪

模块(见图 1)。该方法充分利用了北斗系统的高精度定位能力和窄带物联网在低功耗、广覆盖等方面的优势, 并为解决物流跟踪中遇到的供电、信号传输、定位信号弱等问题提供了有效的应对策略, 旨在为电商物流提供更加智能化、可靠性的实时追踪解决方案。

## 2. 我国电商物流运输的现状

### 2.1. 电商物流的快速发展与市场需求

根据《中国新电商发展报告 2024》, 电子商务物流近年来呈现出快速发展的态势, 这与电子商务交易量的持续增长以及消费者对高效、便捷服务需求的不断提升密切相关。随着在线购物规模的扩大, 物流企业加大了在仓储和配送网络的投入, 确保商品能够快速、高效地送达消费者手中。此外, 技术进步成为推动电商物流发展的重要引擎, 无人机配送、自动分拣系统等智能化设备的应用显著提升了物流处理速度和准确性。同时, 物流企业还在服务模式上进行了创新, 例如, 提供灵活的配送时间选择和自提点服务, 以满足消费者对个性化需求的诉求。

### 2.2. 电商物流行业痛点

尽管电商物流规模不断扩大, 但相关基础设施建设却未能同步跟进。许多地区, 尤其是三四线城市和农村地区, 物流配送网络覆盖率较低, 仓储设施落后, 导致最后一公里配送成本居高不下。此外, 跨区域物流的协同效率较差, 区域间资源分配不均衡, 进一步加剧了配送压力。相比发达国家, 我国物流行业在自动化、智能化方面仍有较大差距。传统的物流管理模式依赖人工操作, 效率低下且易出错。

传统的物流信息跟踪模式主要依赖人工操作, 主要为工作人员现场记录物流数据并手动输入至物流信息系统, 满足电商物流实时监控需求。然而, 这种方式不仅耗时费力, 而且容易产生记录数据错误, 无法满足用户对“分钟级”追踪的需求[3]。近年来, 物联网等先进技术的快速发展, 自动化追踪逐步取代了传统的人工操作模式。通过引入数据采集技术和通信技术, 可以实现物流信息的智能化采集与高效传输, 并结合数据处理与分析方法, 构建起物流信息实时跟踪系统。这一技术进展为电商物流管理带来了革新性的变化。

## 3. 系统设计创新点

### 3.1. 系统总体架构设计

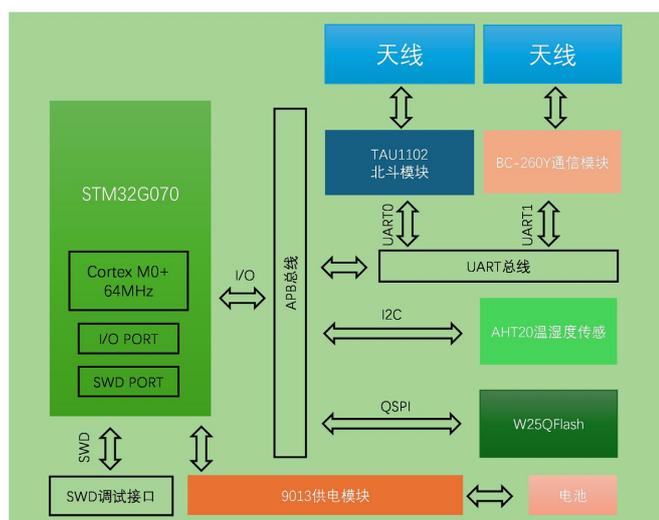


Figure 2. System framework diagram of the e-commerce logistics real-time tracking module  
图 2. 电商物流实时追踪模块系统框架图

物流运输跟踪与常规车辆运输的跟踪主要区别在于跟踪模块部署环境以及需要处理的信息量不同, 车辆运输跟踪模块主要集成在汽车的驾驶室, 具备良好的供电条件, 以及良好的数据上传通路, 所需要处理的数据仅为车辆的速度和位置相关信息。物流运输跟踪模块与被运输物品放置, 需要承担传感器数据读取、边缘计算等功能, 因此模块的硬件架构的合理性、目标的实现程度以及设计方案的合理性是影响系统性能的关键因素。在进行软硬件设计时, 必须首先确定整个监测系统的总体方案。电商物流实时追踪系统由三层分层式硬件架构组成, 分别是电源层、感知层、数据传输层。模块通过将物流跟踪解耦为三个不同的层次, 尽可能以较低延迟和较少电量消耗, 当某一层次出现故障无法正常使用时, 尽可能减小对其他层次的影响。系统的总体设计如图 2 所示, 本系统选用低功耗的 STM32G070 微处理器作为核心处理器, 采用华大北斗 TAU1102 定位芯片, 定位精度可达 1.5 米。选用移远通信 BC-260Y 模组使系统的数据传输能够适应复杂环境, 确保数据传输的稳定性。

### 3.2. 系统供电电路详细设计

随着中国“碳达峰、碳中和”战略目标的全面推进, 工业和信息化部《“十四五”工业绿色发展规划》明确提出加快构建绿色制造体系, 强化电子信息技术在节能降碳中的赋能作用。在此背景下, 物流跟踪系统作为智能化设备的核心控制单元, 其供电系统的能效优化与清洁能源适配已成为响应《中国制造 2025》绿色升级要求的关键技术路径。本系统采用动态电压调节(LDO)和双路电源供电设计, 严格遵循 GB/T 35758-2017《微控制器单元能效限定值及能效等级》标准, 通过智能电源管理模块实现待机功耗低于  $10\ \mu\text{W}$  的设计指标, 有效契合《工业能效提升行动计划》中“到 2025 年重点用能设备能效提升 20%”的阶段性目标[4]。

在物流运输过程中, 首选的供电方式是从运输工具取电, 但是这样的方式存在以下问题: 首先, 不同的运输载具提供的供电接口和供电电压不尽相同, 其次当被运输物品从运输工具卸载时, 无法保证持续对物流跟踪模块进行有线供电, 故模块的供电设计必须包含有线与电池供电切换电路, 为跟踪系统提供双路电源接入。要确保在出现电压波动, 有线和电池切换时, 实现系统不间断运行。设计双路电源切换电路如图 3 所示。

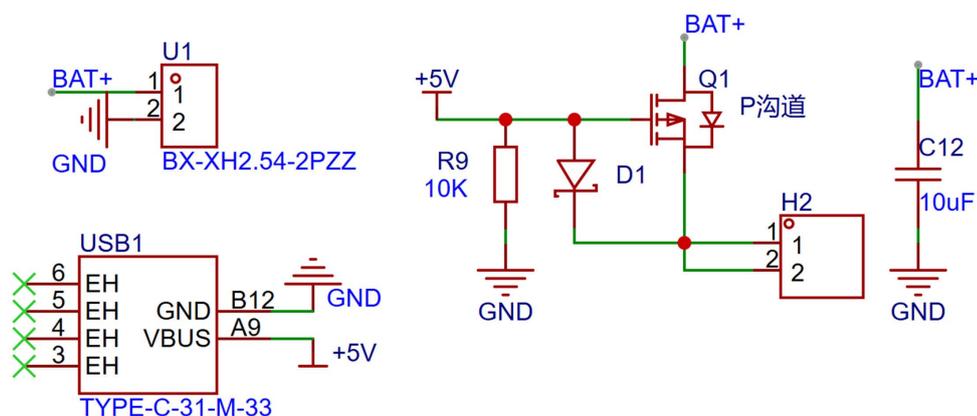


Figure 3. Circuit diagram of the dual-channel self-switching uninterruptible power supply  
图 3. 双路自切换不间断电源电路图

供电由 Type-C 接口、锂电池接口双路供电。当一个系统中同时有电池(3.7 V~4.2 V)与供电接口(5 V)时, 同时接入的两个电源存在电压差, 存在电源倒灌的风险。因此, 设计电源切换电路, 当供电接口没有接入时, 电池给系统供电, 当供电接口接入时, 电池不再供电。当使用电池供电时, 由于 R9 电阻的接

地下拉, 使得 P 沟道 Mos 管栅极  $V_G$  电位接近于 0V,  $V_{GS} < V_{TH}$ , 此时 P 沟道 Mos 管导通, 电流从漏极 D 流向源极 S。当接入 Type-C 接口的 5V 电源时, 栅极 VG 电位接近于 5V,  $V_{GS} > V_{TH}$ , P 沟道 Mos 管截止, 电池电流不能从漏极 D 流向源极 S, 此时 5V 电源电流通过肖特基二极管 D1 流向开关处的 VCC\_POWER 为系统供电。

需要注意的是, 选取器件 P 沟道 Mos 管的栅极阈值电压  $V_{GSTH}$  不能太高, 否则电池电压无法饱和和导通, 虽然也能够达到电路切换效果, 但此时 Mos 管会发热严重可能导致烧坏。另外需要注意的是, 该电源切换电路中若电池电压高于输入电压则无法使用。

### 3.3. 物流追踪详细设计

物流跟踪模块需要精确获取运输物流的状态信息, 降低数据的处理时间、通讯延迟, 要尽可能快地解析出精确的物流位置、速度、经纬度等位置信息。同时, 还要尽可能降低系统的整体功耗。因此, 选择 STM32G070 单片机在物流跟踪模块中担任核心控制器的角色。本节设计物流运输中使用 AHT20 传感器采集食物运输过程中温湿度信息为例说明模块的感知层设计。

系统启动后, STM32G070 主控首先完成硬件初始化流程, 包括配置 UART1 和 UART2 两个串口外设。其中, UART1 以 115,200 波特率连接华大北斗 TAU1102 GPS 模块, 用于接收 NMEA 定位数据; UART2 以 9600 波特率连接移远 BC260 NB-IoT 模块, 负责建立无线通信链路。初始化阶段同步完成系统时钟校准、RTC 时间同步等基础配置。

当 GPS 模块开始输出定位数据时, 系统通过 DMA 连续接收原始 NMEA 语句, 并对 GPGGA、GPRMC 等关键语句进行实时解析。数据有效性校验模块会综合检查卫星数量、定位状态标志和精度因子等参数, 仅当卫星数  $\geq 4$  且 HDOP  $\leq 2.0$  时判定为有效定位。解析后的经纬度数据经 WGS84 坐标系转换处理, 速度值则通过 VTG 语句的 kph 字段获取, 并进行单位统一化处理。

有效数据经校验后进入协议封装阶段, 系统将时间戳、坐标点、速度值等参数按预定格式打包为 JSON 数据结构。此时通信模块会检测 BC260 的网络连接状态, 若未建立连接则通过 AT 指令发起 NB-IoT 网络附着流程, 依次执行 APN 配置、MQTT 连接建立等操作。在确认 TCP 连接正常后, 系统通过 MQTT 协议将封装好的定位数据包发送至云端服务器, 消息传输采用 QoS1 等级确保可靠性。

数据到达服务器端后, 首先进行安全认证与完整性校验, 验证通过后进入数据处理流水线。原始数据被持久化存储到时序数据库的同时, 实时计算引擎会进行运动轨迹分析、超速预警等业务处理。Web 服务接口将处理结果通过地图 API 进行可视化渲染, 生成实时位置显示和历史轨迹回放。

整个流程包含多重容错机制: 当 GPS 信号丢失时, 系统自动切换至基站定位备用方案; 网络传输失败会触发本地数据缓存和指数退避重传策略; 电源管理系统根据设备运动状态动态调整 GPS 采样率和通信模块的 DRX 周期, 在保证功能可靠性的前提下优化能耗表现。所有关键操作均记录带签名的时间日志, 满足车规级设备的数据追溯要求。

### 3.4. 温湿度采集详细设计

STM32 通过硬件 I2C 与 AHT20 通信的过程主要分为硬件配置、传感器初始化、触发测量、数据读取和解析几个步骤[5]。首先需要配置 STM32 的 I2C 外设, 选择 I2C1 接口, 并将对应的 SCL (如 PB6) 和 SDA (如 PB7) 引脚设置为复用开漏模式, 同时启用内部或外部上拉电阻 (通常 4.7 k $\Omega$ )。接着初始化 I2C 参数, 设置时钟频率为 100 kHz 或 400 kHz (AHT20 最高支持 1 MHz), 并选择 7 位地址模式[6]。STM32 作为主设备时无需设置自身地址, 但需确保从设备地址正确 (AHT20 的默认地址为 0x38)。

通信开始时, 需先唤醒并初始化 AHT20。通过 I2C 发送 3 字节命令 0xBE 0x08 0x00, 该命令会加载

传感器的校准参数, 完成后需延时约 10 毫秒等待初始化生效。随后发送触发测量指令 0xAC 0x33 0x00, 此时传感器开始采集温湿度数据, 测量耗时约 80 毫秒。在此过程中, STM32 需不断读取传感器的状态值(通过 I2C 接收单字节数据), 检查其最高位(bit7)是否为 0。若该位为 1, 表示传感器仍在处理数据, 需持续轮询直至状态位清零。

测量完成后, STM32 可从 AHT20 连续读取 6 字节数据包。其中前 5 字节包含 20 位湿度原始值、20 位温度原始值和状态信息, 第 6 字节为 CRC 校验码。读取数据后需进行数据转换: 将湿度原始值右移 4 位后, 乘以 100 再除以 2 的 20 次方, 得到湿度百分比; 温度原始值则需取低 4 位与后续字节组合, 乘以 200 后除以 2 的 20 次方, 再减去 50, 最终得到摄氏度温度值。实际应用中建议添加 CRC 校验以提高可靠性, 并注意传感器供电需稳定在 3.3 V, 避免因电压波动导致通信失败。

整个流程可通过 HAL 库函数(HAL\_I2C\_Master\_Transmit 和 HAL\_I2C\_Master\_Receive)实现, 关键点在于严格遵循时序要求, 例如测量等待时间和命令间隔。若通信异常, 可优先检查 I2C 地址是否偏移(HAL 库要求 7 位地址左移 1 位, 因此实际发送地址为 0x70), 或通过逻辑分析仪抓取 I2C 波形排查硬件连接问题。此外, 长时间不使用时可通过发送休眠命令 0xBA 降低传感器功耗。

#### 4. 北斗定位精度优化策略

上述北斗高精度定位可以做到准确的定位, 包括模块的位置和速度等信息, 但模块接收的原始信号解码的数据仍然需要进行处理, 信号干扰、计算误差等原因会引入误差, 本节使用卡尔曼滤波的方法, 通过建立状态转移矩阵, 对接收到的数据进行卡尔曼滤波后进行分析处理, 得到更为精确的定位结果, 其优化策略在于, 所述数据处理模块采用卡尔曼滤波算法对加速度信号进行优化。

卡尔曼滤波是一种基于状态空间模型的递归最优估计算法, 适用于线性动态系统的高效实时状态估计[7]。卡尔曼滤波在电商物流跟踪中的应用主要体现在动态状态估计和时间预测优化两方面。其核心价值在于通过融合历史规律与实时观测数据, 实现运输状态的多维度精细化预测。其核心原理通过两个交替步骤实现: 预测(时间更新)和更新(测量修正)。首先利用系统的状态方程和过程噪声协方差预测当前状态及其误差协方差; 随后结合观测方程和测量噪声协方差, 以卡尔曼增益为权重对预测值与实际测量值进行加权融合, 得到最优状态估计。该算法假设系统噪声与观测噪声均为高斯白噪声, 且状态与观测模型均为线性, 通过最小化估计误差协方差矩阵的迹实现最优线性无偏估计。卡尔曼滤波广泛应用于导航、机器人定位、信号处理等领域, 其递归特性与计算高效性使其成为动态系统状态估计的基础工具。

卡尔曼滤波具体包括以下步骤:

1) 状态预测: 根据前一刻的状态估计值及系统动力学模型, 预测当前时刻的状态向量及协方差矩阵, 其数学表达式为:

$$\hat{x}_k^- = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k \quad (1)$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (2)$$

其中,  $\hat{x}_k^-$  为预测状态向量,  $F_k$  为状态转移矩阵,  $B_k$  为控制输入矩阵,  $u_k$  为外部控制量,  $P_k^-$  为预测协方差矩阵,  $Q_k$  为过程噪声协方差矩阵。

2) 观测更新: 结合北斗模块读取到的速度信息实测数据对预测值进行修正, 更新公式为:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (5)$$

其中,  $K_k$  为卡尔曼增益,  $H_k$  为观测矩阵,  $z_k$  为传感器观测值,  $R_k$  为观测噪声协方差矩阵,  $I$  为单位矩阵。

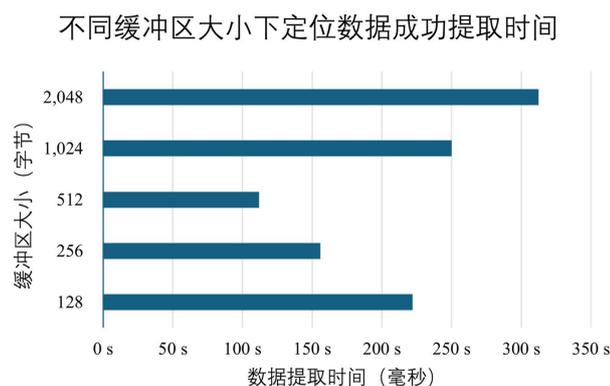
3) 迭代优化: 将更新后的状态向量  $X_k$  及协方差矩阵  $P_k$  作为下一时刻的初始值, 实现动态噪声抑制和信号平滑。

对电商物流实时追踪模块建立卡尔曼滤波模型, 需要确定状态变量。北斗 NMEA 报文中包含加速度和速度数据。将速度和加速度作为状态向量的一部分, 这样可以利用加速度信息来预测速度的变化。当加速度信息不可用时, 通过提高定位模块的采样速率, 可以采用假设一个匀速模型, 在构建状态转移矩阵  $F_k$  时, 采用前一刻的状态与此刻状态相同作为状态转移方程。

自适应权值调整通过动态修正观测噪声协方差矩阵(R 矩阵)和过程噪声协方差矩阵(Q 矩阵), 优化卡尔曼滤波的估计精度。在北斗导航中, 该技术可针对多路径效应、信号遮挡等动态误差源进行实时补偿。

## 5. 数据缓冲区大小与解析时间测试

当模块自串口接收来自华大北斗 TAU1102 的 NMEA 报文时, 首先通过 DMA 和设备总线进行数据的存储, 其次对存储器中的 NMEA 报文进行有效数据的提取。根据开辟缓冲区的大小不同, 以及数据刷新频率的不同, 其解析到定位数据的时长如图 4 所示。



**Figure 4.** Comparison chart of positioning data successful extraction time under different buffer capacities  
**图 4.** 不同缓冲区容量下定位数据成功提取时间对比图

经过对比测试实验, 得出结论在缓冲区为 512 字节时, 接收解析的效率最高。分析可能的原因是, 当缓冲区过大时, 程序需要遍历整个缓冲区以解析数据, 此时需要消耗较多的时间在有效数据搜索上。当缓冲区过小时, 模块可能在没有取到完整的 NMEA 有效语句时缓冲区发生溢出, 导致语句覆盖等异常, 单次获取时无法取得有效的定位数据。

## 6. 总结

本研究基于智能传感器融合与边缘计算技术, 成功构建了面向电商物流的实时追踪模块系统。通过 STM32 单片机集成北斗高精度定位模组、温湿度传感器及加速度计, 实现了物流运输过程中经纬度坐标、环境参数与运动状态的同步采集。测试数据表明, 该模块定位误差小于 2.5 米, 温湿度检测精度分别达到  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  和  $\pm 3\% \text{RH}$ 。系统创新性地采用边缘计算架构, 通过在本地节点部署自适应滤波算法和异常状态识别模型, 大幅缩短定位数据处理时间。相较于传统云中心处理模式, 网络带宽占用降低 62%, 在弱网环

境下仍能保持核心数据的稳定传输, 有效满足了电商物流对货物轨迹与运输环境监控的精度要求。

## 参考文献

- [1] 汤浩. 基于数字经济崛起的跨境电商物流模式研究[J]. 中国储运, 2025(4): 52-53.
- [2] 吴莲莲. 基于北斗的智能物流服务系统的研究与设计[J]. 北斗与空间信息应用技术, 2024(4): 12-17.
- [3] 陈梅. 全国统一大市场背景下贵州省快递物流发展问题及对策[J]. 中国管理信息化, 2024, 27(24): 172-174.
- [4] 沈林江, 崔超, 徐胜霞, 等. 多用户多边缘服务器的低碳算网技术研究[J]. 数据与计算发展前沿(中英文), 2024, 6(5): 91-101.
- [5] 尹海博, 徐熊, 郭杭. 基于 GNSS 的物流信息跟踪系统设计[J]. 导航定位学报, 2021, 9(6): 96-103.
- [6] 王芬芬, 刘梦影, 林玉成, 等. 基于 MCU 的低功耗 I2C 总线控制器设计与实现[J]. 电子技术应用, 2024, 50(9): 77-82.
- [7] 张兆国, 朱时亮, 王法安, 等. 基于改进自适应卡尔曼滤波算法的温室 UWB 定位技术[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 494-502+522.