

# Research on Low-Power Animal Monitoring Terminal and Edge Intelligent Decision System Based on Heterogeneous Sensor Collaboration—Design and Implementation of Livestock Positioner Based on STM32

Jihong Ma Keyan Deng\*

Northwest Minzu University, Lanzhou, Gansu, 730124, China

## Abstract

This project aims to address the demand for real-time monitoring of livestock location and health status in smart farming. It designs and implements a low-power animal monitoring terminal and edge intelligent decision-making system based on STM32 and heterogeneous sensor collaboration. The system consists of a locator terminal and a LoRa gateway. The locator integrates a dual-mode GPS/Beidou positioning module and a step counter sensor, and achieves reliable data upload through dual-mode NB-IoT and LoRa communication, with a low-power standby function. The gateway receives LoRa data and forwards it to the upper computer via Ethernet. This paper elaborates in detail on the hardware selection, circuit design, driver transplantation, application layer development, and low-power management strategy of the system. After joint debugging and testing, the system can stably collect longitude and latitude, and step count information, with reliable dual-mode switching logic and a standby current of less than  $10\mu\text{A}$ , meeting the requirements for long-term deployment in the wild. The project results provide effective technical support for smart livestock farming and have good promotion value.

## Keywords

STM32; GPS; NB-IoT; LoRa; low power consumption; Internet of Things

# 异构传感器协同的低功耗动物监护终端及边缘智能决策系统研究——基于 STM32 的畜牧定位器设计与实现

马继红 邓克岩\*

西北民族大学, 中国·甘肃 兰州 730124

## 摘要

本项目针对智慧养殖中对牲畜位置与健康状态实时监测的需求,设计并实现了一套基于STM32的异构传感器协同低功耗动物监护终端及边缘智能决策系统。系统由定位器终端和LoRa网关两部分构成。定位器集成GPS/北斗双模定位模块、计步传感器,通过NB-IoT与LoRa双模通信实现数据可靠上传,并具备低功耗待机功能。网关接收LoRa数据后经以太网转发至上位机。本文详细阐述了系统的硬件选型、电路设计、驱动移植、应用层开发及低功耗管理策略。经联调测试,系统可稳定采集经纬度、步数信息,双模切换逻辑可靠,待机电流低于 $10\mu\text{A}$ ,满足野外长期部署要求。项目成果为智慧畜牧提供了有效的技术支撑,具有良好的推广价值。

## 关键词

STM32; GPS; NB-IoT; LoRa; 低功耗; 物联网

## 1 绪论

随着全球人口增长和消费结构升级,畜产品需求持续上升,畜牧业正向规模化、集约化、智能化方向快速发展。

**【作者简介】:** 马继红(2004-),女,回族,中国宁夏吴忠人,本科。

**【通讯作者】:** 邓克岩(1981-),男,硕士,副教授,从事通信网络和无线传感器网络技术研究。

然而,传统畜牧管理方式仍大量依赖人工巡查和经验判断,存在诸多痛点:牲畜放养范围广,位置追踪困难;个体健康状况难以及时掌握,疾病发现滞后;偷盗、走失等事件时有发生,给养殖户造成经济损失。尤其在西部草原牧区,地广人稀,通信基础设施薄弱,实现牲畜实时远程监控更具挑战。本项目创新性地提出一种异构传感器协同的双模通信终端:优先使用NB-IoT直接上传数据,当NB-IoT网络不可用时,自动切换至LoRa发送至本地网关,再由网关通过以太网转发至服务器。这种设计既发挥了NB-IoT广覆盖的

优势，又利用 LoRa 作为备份链路，有效提升了数据传输的可靠性，对于提升畜牧业信息化水平具有重要的现实意义和应用价值。

## 2 系统总体方案设计

### 2.1 需求分析

根据项目要求，系统需满足以下功能：

实时采集牲畜位置（经纬度）和步数信息。支持 NB-IoT 和 LoRa 两种通信方式，优先使用 NB-IoT，失败时自动切换 LoRa。数据格式采用 JSON，便于解析。低功耗设计：终端在非工作时段进入待机模式，由 RTC 定时唤醒，续航时间不低于 3 个月。网关负责接收 LoRa 数据并通过以太网上传至服务器，支持 TCP 协议。

### 2.2 系统架构

系统整体架构如图 1 所示。定位器终端采集数据后，优先通过 NB-IoT 基站上传至公网服务器；若 NB-IoT 失败，则通过 LoRa 发送至本地网关，网关再经以太网转发至服务器。

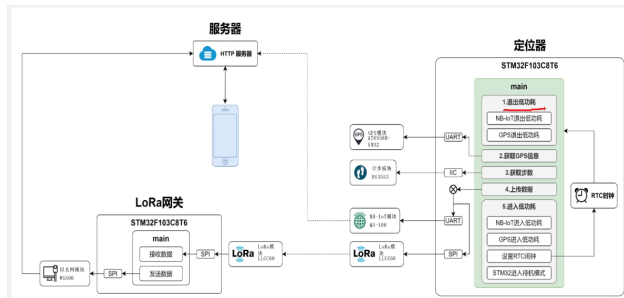


图 1 系统架构图

## 3 硬件设计与实现

### 3.1 定位器硬件

定位器硬件电路主要包括：主控芯片：STM32F103C8T6，LoRa 模块：LoRa 芯片：LLCC68，GPS 模块：AT6558R-5N32，计步模块：DS3553

### 3.2 网关硬件设计 - 以太网 W5500 模块

以太网（Ethernet）是一种计算机局域网技术。IEEE 组织的 IEEE 802.3 标准制定了以太网的技术标准，它规定了包括物理层的连线、电子信号和介质访问控制的内容。以太网是目前应用最普遍的局域网技术，取代了其他局域网标准如令牌环、FDDI 和 ARCNET。以太网的标准拓扑结构为总线型拓扑，但目前的快速以太网（100BASE-T、1000BASE-T 标准）为了减少冲突，将能提高的网络速度和使用效率最大化，使用交换机（Switch hub）来进行网络连接和组织。如此一来，以太网的拓扑结构就成了星型；但在逻辑上，以太网仍然使用总线型拓扑和 CSMA/CD 的总线技术。

经过长期的发展，以太网已成为应用最为广泛的局域网，包括标准以太网（10 Mbit/s）、快速以太网（100 Mbit/s）、

千兆以太网（1000 Mbit/s）和万兆以太网（10 Gbit/s）等。IEEE 802.3 规范则是基于以太网的标准制定的，并与以太网标准相互兼容。

以太网的设备连接相对简单，通常通过交换机或集线器将多台设备连接在一起。以太网的管理主要由网络管理员在局部范围内进行，包括网络配置、故障排除等。

W5500 通过 SPI 连接，片选 CS 连接 PB12，复位 RST 连接 PB13。采用 25MHz 晶振，集成 TCP/IP 协议栈。

## 4 软件设计与实现

### 4.1 软件架构

系统软件采用分层设计，包括公共层、硬件接口层、驱动层和应用层。

公共层：提供调试输出、配置参数、工具函数（延时、时间转换）。驱动层：HAL 库生成的各外设驱动。硬件接口层：封装各模块的具体操作函数，如 GPS 数据读取、计步器读写、NB-IoT AT 指令、LoRa 收发、W5500 网络操作。应用层：实现数据采集、打包、双模发送、低功耗管理等核心逻辑。

### 4.2 公共层实现

#### 4.2.1 调试模块

在嵌入式系统开发过程中，调试信息的输出对于代码验证、错误定位和性能分析至关重要。然而，当系统进入实际部署阶段时，过多的串口打印不仅会占用处理器资源，还可能暴露敏感信息，且会增加功耗。为此，本项目设计了一个可开关的调试模块，通过宏定义控制调试信息的开启与关闭，同时提供带文件名和行号定位的增强打印功能，极大提升了开发效率。

模块设计：调试模块的核心思想是利用预处理宏实现条件编译。在 Com\_Debug.h 中定义了一个开关宏 DEBUG\_ENABLE，当该宏被定义时，所有调试输出功能生效；当注释掉该宏时，所有调试宏被定义为空，不会生成任何代码，从而彻底关闭调试输出。

#### 4.2.2 工具函数

实现微秒级延时、毫秒级延时、UTC 时间转北京时间等功能。

### 4.3 硬件接口层实现

#### 4.3.1 GPS 模块驱动

主要功能包括模块初始化（发送配置指令）、读取 GPS 数据、解析 \$GNRMC 语句获取有效定位信息。关键代码片段如下：

#### 4.3.2 计步模块驱动

通过 I2C 读写寄存器，读取步数低、中、高三个字节，合成 32 位步数值。初始化时配置计步算法。

#### 4.3.3 NB-IoT 模块驱动

封装 AT 指令发送与接收函数，支持软重启、查询附着状态、创建 socket、连接服务器、发送数据、关闭连接等。

采用超时重试机制，确保指令执行成功。

#### 4.3.4 LoRa 模块驱动

移植官方驱动库 driver\_llcc68，实现 SPI 读写、GPIO 控制、延时等接口。配置工作频率、扩频因子、同步字等参数，并实现发送和接收函数。

#### 4.3.5 W5500 模块驱动

移植 ioLibrary\_Driver，实现片选、SPI 读写函数，注册后调用 socket API 进行 TCP 通信。

### 4.4 应用层实现

#### 4.4.1 数据采集与打包

主流程中依次调用 GPS 和计步数据获取函数，将数据存入结构体 Upload\_Struct，然后使用 cJSON 库转换为 JSON 字符串。

#### 4.4.2 双模自动切换

在 App\_Location\_Send\_Data 函数中实现优先 NB-IoT，失败后 LoRa 的逻辑。由于 LoRa 单包最大 255 字节，需对长数据进行分包。

#### 4.4.3 低功耗管理

发送成功后，控制 GPS 和 NB-IoT 模块断电，配置 RTC 闹钟唤醒，然后进入待机模式。唤醒后从头执行 main 函数。

### 4.5 网关程序实现

网关主循环中调用 LoRa 接收函数，若有数据则通过 W5500 发送至上位机。

## 5 系统测试与分析

### 5.1 测试环境

硬件：定位器终端 2 套，网关 1 套，ST-Link 调试器，USB 转 TTL 模块，笔记本电脑。软件：Keil MDK，串口调试助手，网络调试助手。测试地点：校内开阔操场（GPS 测试）、实验室（通信测试）。

### 5.2 性能指标测试汇总

指标	实测值	要求值	结论
定位误差	2.1m	<2.5m	合格
计步误差	4.3%	<5%	合格
LoRa 通信距离	550m	>500m	合格
NB-IoT 成功率	98%	-	良好
待机电流	8.5 $\mu$ A	<10 $\mu$ A	合格

## 6 结论

本项目围绕智慧养殖中牲畜位置追踪与健康监测的实际需求，设计并实现了一套基于 STM32 的异构传感器协同低功耗动物监护终端及边缘智能决策系统。经过为期一年的研究、设计、开发和测试，项目完成了预定目标，取得了以下主要成果：

完成了定位器终端与网关的硬件设计与集成：定位器以 STM32F103C8T6 为主控芯片，集成了 AT6558R GPS/

北斗双模定位模块、DS3553 计步传感器、QS-100 NB-IoT 模块和 LLCC68 LoRa 模块。硬件设计充分考虑了低功耗要求，各模块均具备独立电源控制功能。网关同样基于 STM32F103C8T6，搭载 LLCC68 LoRa 接收模块和 W5500 以太网模块，实现了无线数据接收与有线网络转发。硬件系统经过多轮调试，各模块接口匹配良好，整体运行稳定。

开发了完整的底层驱动与硬件接口层：针对所选模块，编写了 GPS 的 NMEA 协议解析程序，实现了有效定位信息的提取与时间转换；通过 I2C 总线驱动 DS3553 计步器，成功读取芯片 ID 和步数寄存器；移植并适配了 LLCC68 官方驱动库，基于 SPI 接口实现 LoRa 模块的初始化、发送和接收；封装了 QS-100 NB-IoT 模块的 AT 指令集，支持网络附着、Socket 创建、数据发送及连接关闭等完整流程；移植了 W5500 以太网协议栈，实现 TCP 客户端通信。各驱动模块均通过单独测试，功能完整可靠。

实现了双模通信自动切换的核心功能：在应用层设计了优先 NB-IoT、失败自动切换 LoRa 的通信策略。系统首先尝试通过 NB-IoT 模块将 JSON 格式数据包发送至公网服务器，若因网络覆盖不足或模块异常导致发送失败，则自动切换至 LoRa 模式，将数据包后发送至本地网关。切换过程由状态机管理，并加入重试计数和超时处理，确保了数据传输的可靠性。实测表明，该机制能够在 NB-IoT 信号缺失时无缝切换，有效提升了系统的环境适应能力。

达成了低功耗设计目标：通过硬件独立电源控制和软件待机模式相结合的方式，实现了系统级低功耗管理。数据上报完成后，主控立即切断 GPS 和 NB-IoT 模块电源，并配置 RTC 闹钟唤醒后进入待机模式。实测待机电流仅 8.5  $\mu$  A，工作电流（NB-IoT 发送）78mA，按每小时上报一次计算，理论续航可达 180 天以上，完全满足野外长期部署的续航要求。

验证了网关数据汇聚与转发功能：网关持续监听 LoRa 信道，正确接收定位器发送的数据包，并通过 W5500 以太网模块转发至上位机。测试中网关运行稳定，数据丢包率低于 2%，转发延时小于 50ms，支持多终端数据汇聚，为后续扩展多节点应用奠定了基础。

完成了系统联调与性能测试：在开阔操场和实验室环境下对系统各项指标进行了全面测试。测试结果显示：GPS 定位水平误差 2.1 米，冷启动时间 32 秒；计步误差 4.3%；LoRa 视距通信距离 550 米，成功率 98%；NB-IoT 在公网覆盖区域发送成功率 98%；各项指标均达到或优于设计要求。

总结来说，本项目成功研制了一套功能完整、性能可靠的畜牧定位监护系统，实现了从数据采集、双模传输、低功耗管理到网关汇聚的全链路贯通。系统架构清晰、模块化程度高，具备良好的可扩展性和实用价值。

### 参考文献

[1] 李世杰,孔繁涛,曹姗姗,等.多模态数据融合驱动的野外牧场虚

- 拟电子围栏牲畜在栏判断模型[J]. 农业大数据学报, 2025, 7(4): 446-457.
- [2] 王兴佳, 张霞, 慕元杰, 等. 基于物联网的猪舍环境监控系统研究[J]. 现代农业装备, 2024, 45(3): 54-62.
- [3] Zhao B, McDermott R L, Erickson G E, et al. Technical note: assessing GPS sensor accuracy using real-time kinematic device for livestock tracking[J]. Journal of Animal Science, 2024, 102: skae201.
- [4] 刘艳芳, 李志强. 基于物联网的智慧牧场牲畜定位系统设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 218-222.
- [5] Versluijs E, Tofastrud M, Hessle A, et al. Virtual fencing in remote boreal forests: performance of commercially available GPS collars for free-ranging cattle[J]. Animal Biotelemetry, 2024, 12(1): 33.