

# 基于 LoRa 的工业监测自组网系统设计

魏源通, 戴亚文

(武汉理工大学 理学院, 武汉 430070)

**摘要:** 工业环境监测同工业生产安全、质量关系紧密, 诸多传感监测系统正被使用于各类工业项目中, 且需求缺口仍然巨大; 工业监测要求传感系统具有低功耗、远距离传输、工作稳定和节点容量大的特点; 针对工业应用现状, 提出一种基于 LoRa (Long Range) 的工业监测自组网协议系统的设计; 系统主控采用 STM32F407 芯片, 同时集成了 8 路 LoRa 模块, 从而提高了网关的节点容量, 具备 W5500 的网络接口和片外存储 flash, 以及预留的 4G 和 GPS 模块; 系统兼备了 LoRa 通信的抗干扰、远距离传输、低功耗的特点, 同时又支持 TCP/IP 网络通信和 4G 通信, 且提供一种 web 上位机的操控前端, 方便用户对系统进行实时的管控; 系统使用一套独有的自组网协议, 可满足工业监测的要求, 具备很高的实际应用价值。

**关键词:** LoRa; 工业监测; 节点容量大; 自组网协议

## Design of Industrial Monitoring ad hoc Network Protocol System Based on LoRa

Wei Yuantong, Dai Yawen

(College of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Industry environmental monitoring is closely related to industrial production safety and production quality. Many sensing monitoring systems are being used in major industrial projects, and the demand is still huge. Industrial monitoring requires sensing systems with low power consumption, long-distance transmission, and stable operation, and hope that the system has a large node capacity. Aiming at this situation, this paper proposes a design of industrial monitoring ad hoc network protocol system based on (Long Range) LoRa. The system MCU adopts STM32F407 chip and integrates 8 channels of LoRa module, which greatly improves the node capacity of the gateway, and has W5500 network interface and off-chip storage flash, and reserved 4G and GPS modules. The system combines the anti-jamming, long-distance transmission and low power consumption of LoRa communication. At the same time, it supports TCP/IP network communication and 4G communication, and provides a control front end of the web host computer, which is user-friendly real-time monitoring of the system. The system uses a unique set of self-organizing network protocols to meet the requirements of industrial monitoring and has high practical application value.

**Keywords:** LoRa; industrial monitoring; large node capacity; ad hoc network protocol

## 0 引言

工业上为了保证生产安全和生产质量, 大量的工业信息监测传感器正投入使用。现就钢铁冶炼工业中对锅炉煤枪管道温度监测采集传感网络系统进行分析, 目前钢铁工业中对管道温度采集的数据普遍采用 zigbee 传输, 其通信距离有限, 无法同时兼顾抗干扰和低功耗, 所以本系统设计采用 LoRa 通信, 相比于 zigbee 通信, 其具有低功耗、抗干扰强和通信距离远的优点<sup>[1]</sup>。但实际应用中, 还是存在 LoRa 通信的邻频干扰<sup>[2]</sup>、LoRa 网关的节点容量有限以及传感网络系统参数无法在线设置的问题。针对这些问题, 并借鉴 modbus 协议的设计思想<sup>[3]</sup>, 本文提出基于 LoRa 的工业监测自组网协议系统的设计。

## 1 系统结构

工业监测自组网系统主要由温度采样节点、通信网关、

上位机服务器和 web 前端四部分组成。

系统工作时, 温度节点负责对环境温度信息进行采集并将温度值通过 LoRa 无线传输给子网关。网关集成有 8 路的子网关, 其负责接收节点温度信息, 网关 MCU 处理信息并打包节点数据通过 TCP 传输方式发送给服务器。上位机服务器负责处理网络通信中上行、下行的数据。web 前端负责显示各类信息, 以及控制指令的下发。

用户可以使用与服务器 IP 地址在同一网段的任何一台 PC 打开 web 上位机的前端即系统的监控界面, 实时监测温度的同时能够在线操控网关。服务器则响应来自前端的数据显示请求, 或是解析处理到来的数据信息或控制信息。

自组网协议的设计实现了 MCU 对 8 路子网关的合理化控制及网关同服务器规范化的信息交互。系统的结构图如图 1 所示。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 温度节点硬件设计

LoRa 温度节点硬件部分包括主控芯片、温度传感器、LoRa 射频模块以及电源管理模块。温度传感器以单总线方式连接主控芯片, 射频模块则以 SPI 接线方式连接主控芯片。

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-08-28。

基金项目: 湖北省高新技术专项 (2017ACA104); 中山市科技局社会公益科技研究项目 (2017syF08)。

作者简介: 魏源通 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线传感网络方向的研究。

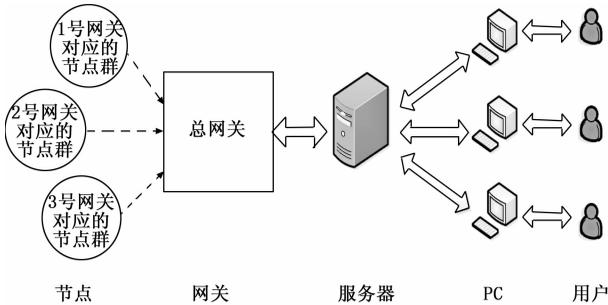


图 1 系统结构图

节点主控芯片使用的是意法半导体 (ST) 公司开发的 STM32L053R8<sup>[4]</sup>, 其具有超低功耗、高速率、外设接口丰富等特点。DS18B20 可编程分辨率的单总线数字温度计, 其具有测温范围广、精度高、转换速度快等特点。SX1276<sup>[5]</sup> 主要采用 LoRaTM 远程调制解调器, 用于超长距离扩频通信, 抗干扰性强, 能够最大限度降低电流消耗, 此外 SX1276 制作成本低, 且具有高灵敏度。节点采用 3.6 V 锂电池供电。

### 2.2 网关硬件设计

网关部分包括 8 路的子网关、主控芯片、WK 系列串口扩展模块、W5500 网口模块和电源管理模块以及其他预留功能模块。

子网关硬件部分无温度传感器, 其余结构大致和节点相同, 微控制器为 STM32L053R8, 搭载了 137 MHz 至 1020 MHz 低功耗远距离收发器 SX1276。

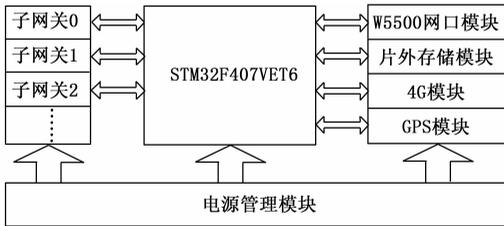


图 2 网关硬件结构

图 2 为网关硬件结构图, 网关的主控芯片采用 ST 公司开发的 STM32F407VET6<sup>[6]</sup>, 这款芯片具有处理速度快、存储容量大、片内功能丰富等特点。W5500<sup>[7]</sup> 是一款全硬件支持 TCP/IP 协议的嵌入式以太网控制器, 可同时支持 8 路的 Socket 独立通信, 具有稳定高速网络通讯的特点。

网关预留了片外存储模块、4G 模块和 GPS 模块。片外存储模块提供 1 G 的外部可读写 flash, 4G 模块为了网关的数据传输增加了一种通信渠道, 用户可以通过 4 G 网络无线终端接收网关实时发送的数据。GPS 模块主要是在全部子网关满载且长时间工作后, 对网关的系统时间进行校准。电源管理部分采用外部 12 V 电源供电。

## 3 系统程序设计

系统程序流程的设计分为三部分: 节点程序流程设计、网关程序流程设计、web 上位机设计流程<sup>[8]</sup>。本节主要就

节点和网关进行分析。

### 3.1 节点程序流程设计

节点对环境温度进行采样并将采样到的温度信息通过数字信号发送到相应的子网关。但在周期采样前节点须先向子网关发送入网请求, 在收到入网许可后, 便开始正常工作。入网请求是为了同子网关的系统时间同步, 而使同一子网关下的全部节点可按同一系统时间来分配发送的时间顺序。入网不成功则需要重新入网。节点程序流程如图 3 所示。

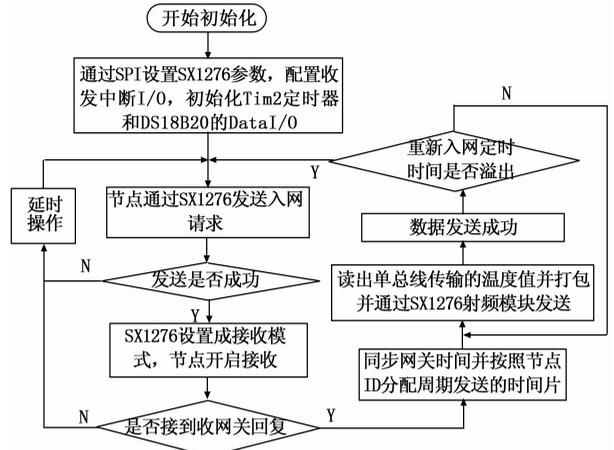


图 3 节点程序流程图

节点的工作流程还遵循自组网协议, 需要按照协议规定的格式和协议规定的指令码进行相应的操作。

### 3.2 网关程序流程设计

网关程序流程设计包括子网关和网关两部分。两者依据自组网协议规范来实现信息的交互和具体的功能。

#### 3.2.1 子网关程序流程设计

子网关的程序流程, 大致和节点的程序流程相反。即节点 SX1276 设置为发送模式入网请求发送, 子网关则将 SX1276 设置为接收模式, 接收到入网信息后, 对信息校验, 校验正确便读取 RTC 时钟信息, 并将时钟值写入回复信息包中, 然后 SX1276 设为发送模式对节点入网信息进行回复。发送成功后, 便开启接收模式, 接收后续节点周期上传的数据或其他节点的入网请求。子网关程序流程如图 4 所示。

WK2124 模块将子网关 4 路的串口转成 SPI 接口连接至网关的 MCU。子网关接收到节点周期信号会将数据通过 WK2124 串口扩展模块继续上传给主网关的 MCU。

#### 3.2.2 主网关程序流程设计

网关通过两个 WK2124 串口扩展模块, 连接并管控 8 路子网关。网关 MCU 主要负责驱动 W5500 网络接口, 处理网络数据, 并将处理后的数据进行上行或下行的传输。

网关上电, 网关 MCU 进行初始化。配置 3 路 SPI, 通过 SPI 读写 W5500 和 WK2124 的寄存器来设置 W5500 和 WK2124。开启定时器, 对网络连接进行侦听计时。网关通过 DHCP 来获取本地 IP 地址, 目的端 IP 地址根据上位机服务器的 IP 地址来配置, 相关端口的设置在 W5500 的初始

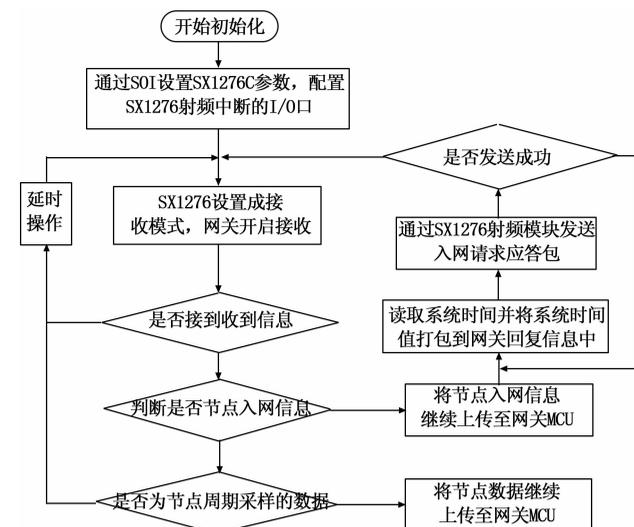


图 4 子网关程序流程图

化中执行。连接建立 8 路 Socket, 分别用于 8 路子网关的数据通信。

查询网络上行的数据, 根据 WK2124 是否产生中断判断是否有上行数据包, 则有则 MCU 进中断解析上行数据, 之后通过网口将经解析的数据包传至服务器。查询网络中下行数据, 通过侦听 0 号 Socket 的接收状态, 判断接收状态寄存器是否置 1, 是则读取数据进行解析并将解析后的数据包通过 WK2124 继续下发至相应子网关, 子网关收到指令便回复具体的应答包。按照以上流程, 程序不断轮循, 期间若出现物理断网或接收超时, 则复位 W5500 重新连网。

对于预留功能模块, 主网关通过串口 3 接收 GPS 模块采集的时间及坐标值。4G 通信模块在 W5500 网口禁用情况下使用, 通过串口 2 发 AT 指令将 4G 模块配置成透传模式, 通过相应的移动终端接收网关发送的数据。

### 3.3 Web 上位机程序流程设计

Web 上位机包括前端显示操作界面、服务器控制台和数据库三部分<sup>[9]</sup>。

服务器工作流程。服务器控制台对设定的端口进行侦听, 网关初始化了 8 个 Socket 对应着 8 路子网关, 并同目的服务器建立了 8 个 TCP 连接, 服务器开启 8 个线程开始对 8 路连接传输的数据进行处理。上行的节点信息或子网关信息直接存入数据库中。

下行指令的处理过程。按照自组网协议, 通过 web 前端的监控界面发送具体指令给服务器控制台, 服务器控制台对指令作出响应同时解析指令信息, 并将解析后的控制包下发至网关, 网关 MCU 再根据自组网协议解析出新指令包并下发给相应的子网关, 子网关进行相应配置, 配置成功信息返回给服务器控制台, 服务器会继续将响应信息回复给前端。

上行数据的处理过程即前端显示数据的过程。服务器从连接中侦听数据, 并将侦听到的值写入数据库, 前端显示界面向服务器发出读数据请求, 服务器响应请求并访问

数据库读取相应的值, 然后将数据发送至前端进行显示。

## 4 自组网协议设计

自组网协议规定了系统通信中每一个数据包的包类型, 其用于通信数据的解析及功能的实现<sup>[10]</sup>。这套自定义的协议所涉及的包类型如表 1 所示。

表 1 协议的包类型

包类型	十六进制值	说明
Distribution_req	0x00	分配请求
Distribution_ack	0x01	分配回复
Joinnet_req	0x02	入网请求
Joinnet_ack	0x03	入网回复
Periodic_up	0x04	周期上传
Instruction_set	0x05	参数设置
Instruction_set_ack	0x06	设置回复
Check_gateway	0x07	网关查询
Check_gateway_ack	0x08	查询回复
Error_ack	0x0a	错误响应
预留功能	—	—

节点数据包有分配请求包、入网请求包和周期采样数据包三类。子网关数据包则包括查询响应包和设置响应包。下行数据包分为查询包和参数设置包。上行的数据包长度定为 16 个字节, 下行的数据包长度定义为 8 个字节, 预留的字节赋值 0x00。包头用于网关 MCU 对上行数据进行校验, 包类型则关联到相应的解析函数。网关参数包括网关频率 (q)、扩频因子 (Spreading Factor, SF)、编码率 (Code Rate, CR)、带宽 (Band Width, BW) 和时隙 (Per)。鉴于子网关数据包与节点数据包相似, 此处仅给出表 2 节点数据帧格式。

表 2 节点数据帧格式

16byte	1	1	1	1	1	2	2	7
Length	Head	type	netcode	type	sid	T	CRC	—
包长	包头	包类型	网关号	包类型	节点号	温度	校验值	预留

在节点刚上电或入网请求接收超时的情况下。节点将分配请求发送给 0 号子网关。0 号子网关收到分配请求后, 根据节点号查询对应子网关的参数, 并将参数写入到分配回复中返回给节点。节点接收成功, 同步了子网关的射频参数后, 便开始发送入网请求给对应子网关。子网关接收到请求后将入网回复发给节点, 节点解析回复包并同步网关系统时间, 按照网关时间标准和节点号所分配的发送顺序, 节点将温度采样信息周期性的发送给子网关。子网关对收到的节点数据包进行 CRC 校验, 校验成功后再添加包头及相关字节, 以 16 字节的上行数据包通过 WK2124 传递给网关 MCU, 网关将校验成功的数据以 16 字节的数据格式通过网口继续传给服务器, 服务器对数据再校验, 并将校验后的数据写入数据库。下行的控制指令, 在 web 前端进行输入, 并通过服务器下发给网关, 网关 MCU 对参数设

置包和网关查询包进行相关解析,再根据网关号 netcode 定向传输给子网关。子网关根据所收到包的包类型再做相应处理,处理成功后子网关将回复对应的参数设置响应包和网关查询响应包。若处理错误则回复 Error\_ack 包。

## 5 系统测试

本设计通过 web 前端界面进行测试。前端界面提供节点数据监控窗口,子网关信息窗口以及指令发送界面。

考虑到实验室的测试设备有限,测试阶段仅开启了 1 号、2 号子网关和处理分配任务的 0 号子网关以及 10 个节点。先前研究证明了子网关程序可以支持节点满载,所以本设计的测试过程是合理的,且测试结果依然可以用来检验设计是否达到预期目标。

#	网关号	节点号	数据类型	温度	存储时间
93302	1	3	04	26.9	2018-08-27 15:54:02.0
93304	1	4	04	27.0	2018-08-27 15:54:03.0
93306	1	5	04	26.5	2018-08-27 15:54:04.0
93308	1	1	04	26.7	2018-08-27 15:54:30.0
93310	1	2	04	26.6	2018-08-27 15:54:31.0
93312	1	3	04	26.9	2018-08-27 15:54:32.0
93314	1	4	04	27.0	2018-08-27 15:54:33.0

图 5 节点数据显示界面

每个子网关搭载 5 个节点,图 5 的界面对各节点的采样温度进行实时监测。节点数据监控窗口只显示 type 为 0x04 的周期采样数据,自动滤除配分请求信息和入网请求信息。

#	网关号	数据类型	频率编号	扩频因子	编码率	带宽	时隙	网关节点数	丢包率	存储时间
141	1	06	1	7	1	0	30	5	0%	2018-08-27 15:56:05.0
140	2	06	2	7	1	0	30	5	0%	2018-08-27 15:55:53.0
137	1	08	1	7	1	0	30	5	0%	2018-08-27 15:54:09.0
138	2	08	2	7	1	0	30	5	0%	2018-08-27 15:54:21.0

图 6 子网关信息显示界面

图 6 的界面显示了子网关的参数信息及接收状态信息。参数信息为当前所设置的参数,接收状态信息为最近一个周期内所统计收到的节点总数(sum)和丢包率(Packet Loss Rate, PLR)。网关信息窗口每个采样周期更新一次,采样周期为时隙值。

指令发送页面比较简洁,发送窗口只支持发送 HEX 的 8 个字节的指令数据,指令发送完成后显示“发送成功!”的字样。当输入 1 号子网关的配置指令改变子网关的射频参数,1 号子网关会将更新的信息发往 0 号子网关,以更新 0 号网关的子网关参数信息表。1 号子网关对应的节点在多次发送入网请求信息都无法获得响应后,则会向 0 网关重新发送分配请求,0 网关会再为其分配新的 1 号子网关的参数信息,节点设置好新的射频参数后,将会重新请求入网。

测试结果显示配置参数后的 1 号子网关一段时间后又陆续收到了节点的入网请求信息,节点便开始周期上传温度数据。在指令发送页面,输入 1 号子网关的查询指令,网关信息窗口便显示出子网关更新后的参数信息。以上测试表明系统成功实现了子网关参数的在线设置。

## 6 结论

系统测试结果符合设计预期要求。测试例举了对 1 号子网关的操作。参照自组网的协议规范,可以实现对多达 8 路子网关的管控,除 0 号子网关负责存储各子网关的射频参数表及分配节点射频参数外,1~7 号子网关都用来接收节点采样数据,这便大大增加了总网关的节点容量。解决了引文中提到的节点容量不足的问题。

对于之前工业上监测整片工业区须要切换多个上位机窗口对温度进行监测的情况。本文的设计在保证测控覆盖范围不变或者更大的前提下,只需通过一个 web 上位机前端对总网关进行操作便可实现所有的基本功能,同时本设计还支持网关参数的在线修改,解决了引文中提到的不支持参数在线修改的问题。

对于 LoRa 通信的邻频率干扰问题,子网关通过统计一个周期的丢包率是否超出阈值以及判断接收信号强度和信噪比是否低于正常工作环境的门限值的这三种判跳机制,来实现子网关的自适应调频。从而解决了邻频干扰问题。

本设计增大了网关集成度,降低了工业上网关的投入成本,运用自组网协议,使系统工作更加灵活和稳定,能为工业监测带来极大的便利。

### 参考文献:

- [1] 赵太飞,陈伦斌,袁 麓,等. 基于 LoRa 的智能抄表系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 298-301.
- [2] 李 坚,刘奎江,丁 浩. GSM-R 系统间邻频干扰案例的分析与处理 [J]. 铁道通信信号, 2013, 49 (2): 74-77.
- [3] 万 明,尚文利,曾 鹏,等. 基于功能码深度检测的 Modbus/TCP 通信访问控制方法 [J]. 信息与控制, 2016, 45 (2): 248-256.
- [4] STMicroelectronics. STM32L053C8/R8 Datasheet—production data [M]. Geneva, Switzerland: STMicroelectronics, 2017.
- [5] Semtech. SX1276/77/78 Datasheet [M]. California, USA: Semtech, 2013.
- [6] STMicroelectronics. STM32F405xx/407xx Datasheet—production data [M]. Geneva, Switzerland: STMicroelectronics, 2012.
- [7] WIZnet. W5500 数据手册 Version 1.0 [M]. 香港: WIZnet, 2013.
- [8] 郭 莹,郭晓冉,毛向东,等. 基于 GSM 和 WSNs 的实验室温湿度采集报警系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36 (8): 92-94.
- [9] 潘 勇,汪指南,郑锐元,等. 基于 Web 的生活用纸检测上位机系统 [J]. 建材世界, 2017, 38 (6): 79-82, 86.
- [10] 徐大伟. 基于 M-Bus 的远程抄表系统的研究与开发 [D]. 华北电力大学, 2015.