

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.03.016

基于 STM32F103 的电力载波 小型路由器设计与实现

甘振华^{1,2}

(1.福建工程学院 福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室, 福建 福州 350118;

2.福建省北斗导航与智慧交通协同创新中心, 福建 福州 350118)

摘要:为解决高校节能监管系统配电站分布离散,各站内计量点规模不大时的远程集抄问题,以 STM32F103 处理器为核心,扩展了 DL/T645-2007 协议的定义,设计支持 3 级中继功能的电力载波 (power line carrier, PLC) 小型路由器。路由器以载波芯片为圆心,实际通信距离为半径,构成等效的直抄、一级中继、二级中继和三级中继蜂窝模型,并以此为基础,建立一个逻辑上以路由器为根节点,各级蜂窝覆盖图为层次的多叉树遍历查询结构,实现了中继路由图的建立和自动中继转发抄表。所设计的中继技术在低压电力载波通信和智能水表远程集抄领域得到了成功应用,可以低成本地替代 RS485 以实现能耗系统的远程抄控。

关键词: STM32F103; 电力载波; 路由器; DL/T645-2007; 中继技术

中图分类号: TN913

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)03-0286-07

Design and realization of PLC mini-router for PLC based on STM32F103

GAN Zhenhua^{1,2}

(1.Fujian Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Beidou Navigation and Smart Traffic Innovation Center of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at the small scale of the remote reading of power meters in the scattered power stations of the energy-saving supervision system of colleges and universities, the mini-router with power line carrier (PLC) was designed based on STM32F103, which expanded the definition of DL/T645-2007 protocol in order to support three-stage relay functions. The router took the PLC chips as the center and the actual communication distance as the radius, forming the equivalent cellular model with direct reading, primary relay, secondary relay and third-stage relay. Also, on this basis, a multi-tree traversal inquiry structure was established, logically, with the router as the root node and all levels of cellular coverages as the hierarchy, so as to correctly established the relay route diagram and achieved automatic relay meter-reading. And the relay method has been successfully applied in the field of low-voltage PLC communication and intelligent water-meter reading system, which could replace RS485 to realize remote control and data collection in the energy consumption system at a low cost.

Keywords: STM32F103; PLC; router; DL/T645-2007; relay technology

目前,我国居民用户和企事业单位的电能计量抄表领域,已经逐步开始实现自动化远程抄收^[1]。

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 福建工程学院科研项目 (GY-H-17035、GY-H-17040、GY-Z13005、GY-Z13125); 福建省教育厅科技项目 (JB13140/GY-Z13088)

作者简介: 甘振华 (1977-), 男, 福建屏南人, 工程师, 讲师, 博士, 研究方向: 电气工程与传感技术。

低压电力线载波通信技术利用现有电力线进行数据传输,实现方便,覆盖范围广,没有铺设线路和运行成本,具有广阔的应用前景^[2]。虽然低压电力载波(power line carrier, PLC)以较低的预算解决了通信线路布置困难、维护工作量大的问题,但是由于供电线干扰和信道衰减所造成的通信距离有限,其在应用上仍具有较大的局限性,因此路由中继成为低压载波通信的关键技术。

基于电力供应的特征,电网所带来的几乎“无线”的特性,使得 PLC 在电能表集抄、电能质量监控和电网故障监测方面得到大量的应用;此外,现代电网分布广泛,目前 PLC 的应用也扩展到家居、安防、暖通和水表等智能化领域^[2-4]。在 PLC 大量应用的电能表集抄领域,特别是针对居民用户的低压电力线远程抄表,各种载波路由机制和算法相继涌现,不断地提高了低压电力线中继抄表的可靠性和成功率^[5-8]。由于算法复杂和公变台区规模较大,造成电网应用的载波路由器成本较高,不大适用于采集网关分布较为离散、各配电站表计规模不大和水表间距较远的高校节能监管系统,所以有必要设计一种规模适中、价格经济的小型电力载波路由器。

1 硬件设计

所设计的电力载波小型路由器以 ST 公司

STM32F103 为核心器件,扩展了 DL/T645-2007 多功能电能表通信协议,具备 64 个节点的 3 级中继路由抄表能力,满足高校变电站、单体建筑和室外数字水表的远程集抄。

STM32F103CB 内核频率 72 MHz,工作性能 90DMIPS,片上 Flash 128KB,SRAM 20KB,并且芯片内部通过 APB 总线扩展了多达 36 个 GPIO 接口;拥有 1 个 RTC、2 个 SPI、3 个 USART 和 4 个 16 位定时器;此外,STM32F103CB 还内嵌了一个支持 16 个优先级的嵌套矢量中断控制器。STM32F103 丰富的标准外设和高扩展能力,可以满足多种工业场合的应用^[9-10]。

小型载波路由器的总体设计如图 1 所示,采用了 LQFP48 封装的 STM32F103CB 处理器,并扩展了一个 SPI 接口的 E2PROM 和一个 38 kHz 红外收发接口。

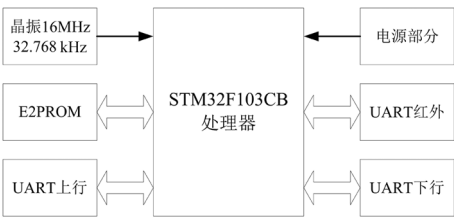


图 1 小型载波路由器总体框图

Fig.1 Structure diagram of PLC mini-router

图 2 为载波路由器 MCU 核心电路原理图。

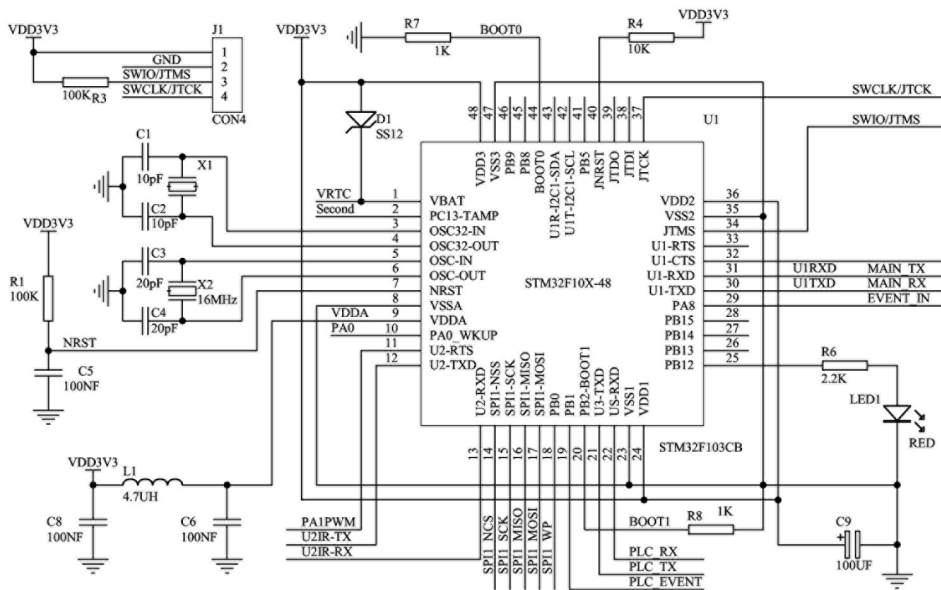


图 2 STM32F103 路由器 MCU 原理图

Fig.2 Schematic circuit of MCU in Router STM32F103

设计以 STM32 的 USART1 为上行串口,直接与网关/采集终端的抄表接口互联;路由器下行通信接口使用 STM32 的 USART3,下挂载波主控芯片;在定时器 2 的 PA1 引脚 TIM2_CH2 通道所发出 38 kHz PWM 脉冲的配合下,扩展 USART2 为红外收发通信接口,作为载波路由器节点参数等档案信息的配置通道。

STM32F103 通过 SPI_1 接口外扩一片 E-2PROM 存储器 25LC512,以满足节点档案信息和路由地址图表的存储需求。路由存储的硬件设计如图 3 所示,工作电压 2.5~5.5 V 的 SOIC8 封装的 25LC512,拥有 512 KBit 存储容量,其 20 MHz 的时钟频率,能够很好地与 STM32F103 高达 18 Mbit/s 的 SPI 接口进行配合。

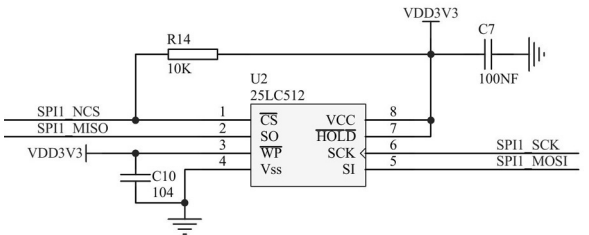


图 3 25LC512 存储器电路设计
Fig.3 Schematic circuit of E2PROM 25LC512

为方便路由器参数配置和现场调试,载波路由器设计的红外通信接口,如图 4 所示。STM32F103 的 USART2 输出端 U2IR_TX 与定时器 TIM2_CH2 通道 PA1 引脚 PWM 输出端,通过 NC7S02 或非运算后产生 DL/T645 所规定的 $(38 \pm$

1)kHz 发射信号,可以十分方便地使用北京振中等电力抄表掌机的红外接口,对路由器载波节点进行档案配置和现场抄控。

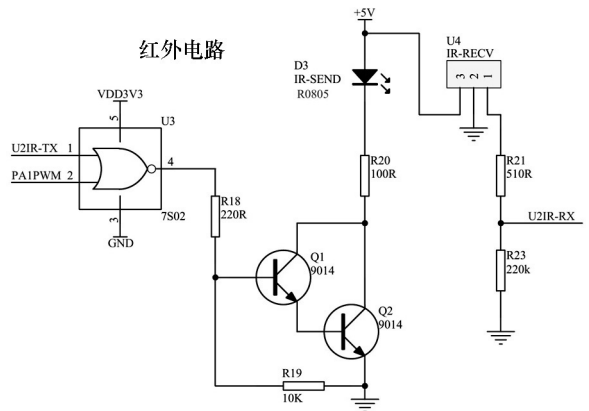


图 4 38 kHz 的红外通信电路
Fig.4 Schematic circuit of infrared communication interface in 38 kHz

2 路由协议和中继模型

2.1 路由协议设计

电力载波集抄系统使用了 DL/T645-2007 协议,它是一个请求/应答型协议,通常由集中器、采集器或掌机等抄表主机发起。当从机接收到需要处理的相应任务帧时,它使用对应的功能码来指示正常响应的数据项,或者通过对应的差错位及错误信息字来指示异常响应。基本的 DL/T645-2007 协议帧如表 1 所示^[11]。

载波路由器与网关/采集终端的上行通道使

表 1 基本的 DL/T645-2007 协议帧基本结构
Tab.1 Basic structure of DL/T645-2007 protocol

前导码	起始(H)	地址域	起始(H)	控制码	数据域长度	数据域	校验码	结束(H)
FE	68	A0-A5	68	C	L	DATA	CS	16

注:前导码为 0 至 4 个 0xFE

用标准的 DL/T645-2007 协议;对于下行的、与载波主控芯片通信的接口,则使用改造后支持中继路由转发功能的扩展 DL/T645-2007 协议。考虑到电力载波通信的抄表帧长一般较短,故在保留 DL/T645 协议帧基本功能的前提下,取消了后续帧概念以支持中继路由配置。

重新定义的扩展了 DL/T645-2007 以支持 3 级路由中继的控制码 C 的结构如图 5 所示^[12]。

为配合中继命令帧内的主站控制码 C 的扩

展,对 DL/T645-2007 数据域也进行相应的扩充,即在数据域前部嵌入中继路由表,同时对应地更新了数据长度域 L 的见图 6。

2.2 中继模型建立

将电力载波集抄系统的载波芯片定为通信节点的圆心,并将其实际通信距离折合为半径,以此等效成一个载波通信的蜂窝,则载波路由器可覆盖的最大半径为:路由器下挂的载波主控芯片覆盖半径 R + 从节点载波芯片覆盖半径 $R \times 3$ 级中

继,其模型结构见图 7。

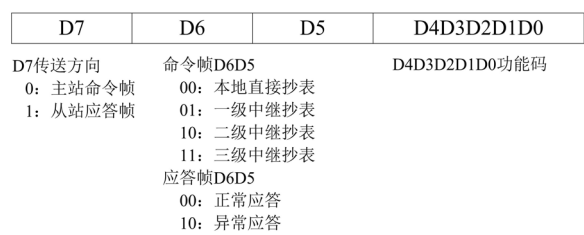


图 5 扩展的主站控制码 C 的结构

Fig.5 Structure of extended control code C in master station

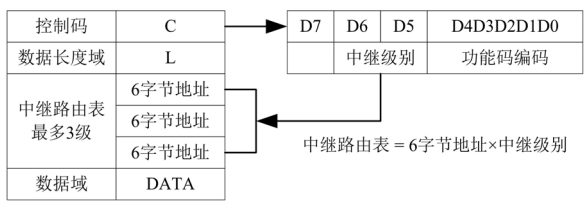


图 6 扩展 DL/T645-2007 数据域内的路由地址表

Fig.6 Routing address table in the extended DL/T645-2007's data domain

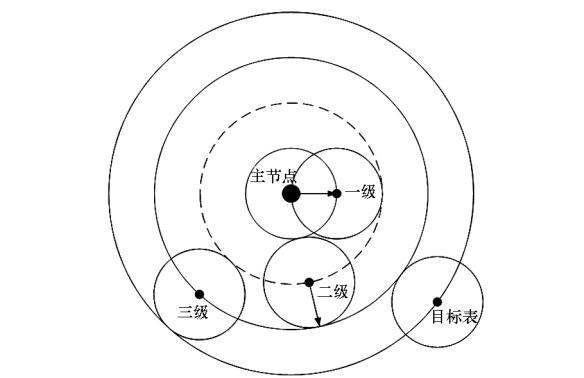


图 7 电力载波 3 级中继的蜂窝结构模型

Fig.7 Cellular model with three-stage relay of PLC

为实现自动路由中继功能,要求采集系统内各载波从节点均应支持中继转发与接收功能。载波路由器对各个载波从节点的路由搜索,就是相当于以路由器(载波主控芯片)为根节点,对采集范围内各载波从节点进行多叉树分层遍历的过程。

载波路由器自动中继的基本思想是建立一个以路由器(载波主控芯片)为根节点的 4 层多叉树查询结构,其逻辑分层见图 8。

在特定的抄表时刻,小型载波路由器内的各

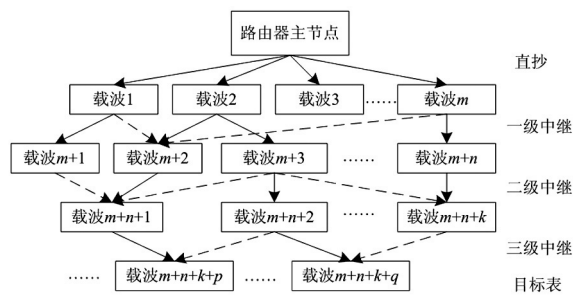


图 8 电力载波中继通信的逻辑层次图

Fig.8 Logic structure of relay communication for PLC

个载波从节点保留一条最近的成功路由。路由器将遍历后的各载波从节点完整的中继路由地址图,存储于外扩的 E2PROM 存储器 25LC512 内,以供下次抄表时,载波路由器的抄表组帧进程能够直接调用。

3 软件设计

小型载波路由器使用 Keil 开发平台所集成的 RTX 实时操作系统^[13-14]。根据中继路由功能的要求,设计了 USART3 载波接收任务(优先级 1)、USART1 上行 645 接收任务(优先级 2)、USART2 红外接收任务(优先级 3)、载波路由查找任务(优先级 4)、扩展 645 路由组帧任务(优先级 5)、USART3 载波发送任务(优先级 6)、USART1 上行 645 发送任务(优先级 7)、USART2 红外发送任务(优先级 8)和看门狗监视任务(优先级 9),共 9 个用户任务。

载波路由器主函数首先配置 STM32F103 内核时钟为 72 MHz,接着初始化 GPIO 端口、中断向量 NVIC、SPI、PWM 和 USART 等外设,然后初始化数据存储器 25LC512,最后调用 RTX 任务初始化函数,此时路由器软件进入 RTX 多任务运行/调度状态。

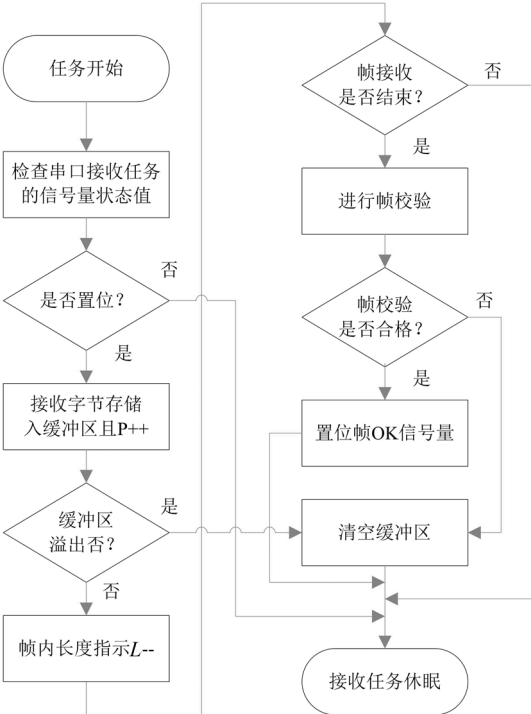
图 9 为 USART 数据帧的收发任务流程。为增加系统的抗干扰能力,USART 串口均采用轮询标志位方式进行数据收发的确认。

当串口 USART 接收到完整的数据帧结构时,将通过置位“帧 OK 信号量”通知相应的处理任务进入就绪状态,以便进行协议帧的解析、执行和应答。

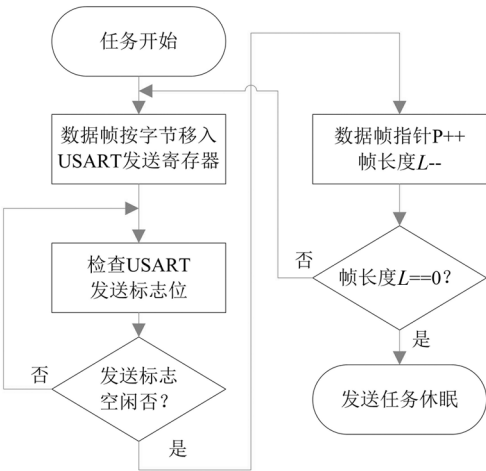
图 10 为路由器建立 3 级中继功能路由图的多叉树搜索流程。

载波路由器抄表任务首先遍历配置于

25LC512 内的表档案节点 pn 列表,标注直接抄表成功的表节点路由状态标志 k 为 1;接着,针对未能直接抄表成功的 $k=0$ 表节点,依次以直接抄表



(a) USART 数据帧的轮询接收



(b) UART 数据帧的发送

图 9 USART 数据帧的收发任务

Fig.9 Flowchart for the Rx/Tx of USART

成功的各个 pn 节点为一级中继节点,构建一级中继抄表的扩展 DL/T645-2007 帧,遍历剩余的未能直接抄表成功的 pn 节点;以此类推,中继目的表节点均以上一级中继成功表的路由图为其中继地

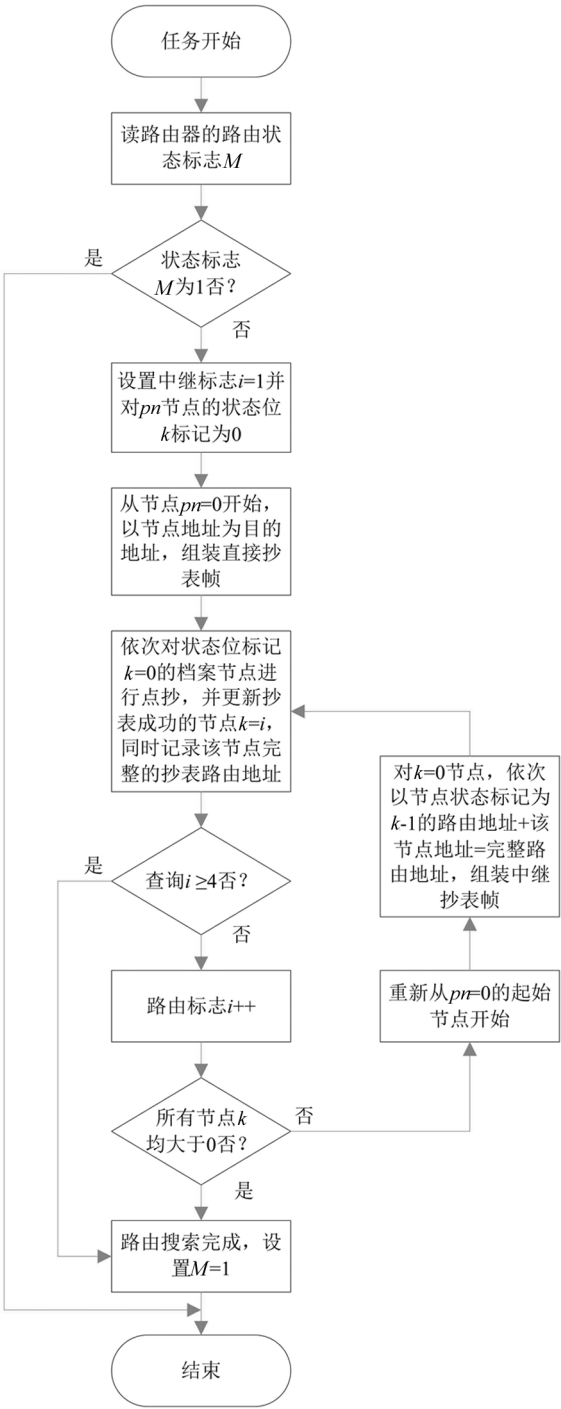


图 10 3 级中继路由搜索流程图

Fig.10 Flowchart for the three-stage relay processing of the router

址,完成二级中继和三级中继路由搜索;最后,对于三级中继搜索仍未能成功点抄的余量节点,将由采集终端标记成节点抄表失败并进行报警提示。

4 测试与验证

首先通过振中掌机 TP900 的红外通信接口对路由器下的载波从节点档案进行配置,此时载波路由器将按红外命令记录/删除抄表节点的档案信息,即路由器需要抄收的载波从节点序号和地址;接着配置载波路由器上行通信串口速率 19 200 bps,下行的载波芯片串口通信速率9 600 bps;最后使用 DL/T645-2007 测试软件和载波中继集抄模拟台区软件,搭建图 11 的测试系统。

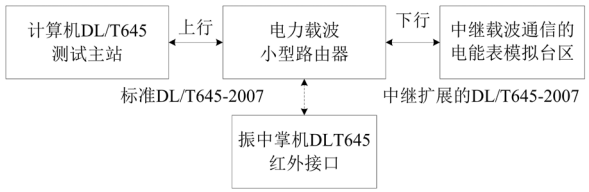


图 11 模拟的载波中继集抄台区测试系统

Fig.11 Simulated testing system for relay collecting platform of PLC

为测试载波路由器的中继策略,配置载波中继集抄模拟台区软件内的测试节点数 10 个(地址 1-10),其中直抄表节点 4 个(地址 1-4),一级中继节点 2 个(地址 5-6),二级中继节点 2 个(地址 7-8),三级中继节点 2 个(地址 9-10),如图 12 所示。



注:直抄表 1-4;一级中继表 5-6;二级中继表 7-8;三级中继表 9-10

图 12 载波中继通信模拟台区

Fig.12 Simulation platform for relay communication of PLC

载波路由器经过路由点抄学习后,建立完整的中继路由地址图。配置模拟台区 9 号节点表的正向有功总能量数据为788 855.82 kW · h,并对 9 号节点的三级中继电能表正向有功总能量数据项

(DI:00010000)进行点抄。此时,由载波路由器组帧所发出,并成功接收到的扩展 DL/T645-2007 命令和应答帧见图 13。载波路由器通过其自动中继抄表机制所抄收到的有效数据内容与模拟台区软件配置的正向有功总能量的数据值是一致的。

[发送数据] 68 09 00 00 00 00 00 68 71 16 34 33 33 33 33 38 33 33 33 33 33 3A 33 33 33 33 33 33 34 33 C8 16

[接收数据] 68 09 00 00 00 00 00 68 91 08 33 33 34 33 B5 88 BB AB E2 16

注:9号表正向有功总能量 788 855.82 kWh,中继路由图为 1↔5↔7↔9

图 13 三级中继抄表的命令与应答帧

Fig.13 The command and the response frames of meter reading in three-stage relay

对路由器和载波中继集抄模拟台区软件的测试节点数均设置 64 个,并在模拟集抄台区软件内建立直抄、一级中继、二级中继和三级中继表共 4 个层次结构,其中每个层次随机抽取 16 个节点,共进行了 200 轮的点抄测试实验,路由器均能够成功搜索和建立中继抄表路由地址图。该路由中继技术结合福软 36-Ⅲ载波路由转发机制,已经成功应用于福建工程学院高校节能监管采集系统。图 14 所示的是福建工程学院学生公寓 I 区的地址 100079 号水表,通过载波中继路由技术成功抄收的 1 d 用水数据。

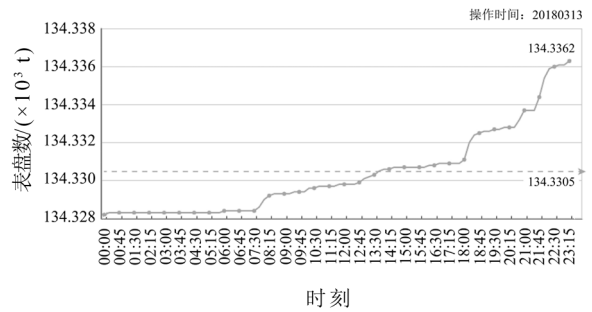


图 14 学生公寓 I 区 100079 号水表日数据

Fig.14 Daily data of Watermeter No. 100079 in the I district of Students' Apartments

节能监管水表采集子系统使用 36 V 双绞线,配合载波通信和路由转发机制,扩展了电力载波技术在能耗监控中的应用范围。

5 结语

针对高校节能监管系统配电站分布离散、各站点表计规模不大,以及室外水表间距较远,主水表数量不多的实际情况,所开发基于 STM32F103 的电力载波小型路由器,扩展了 DL/T645-2007 协

议的定义,能够可靠地建立 3 级中继抄表路由图,并实现水/电表的自动中继抄表功能。该技术在低压电力载波通信和智能水表远程集抄领域得到了成功应用,可以低成本地替代 RS485 实现能耗监管和采集系统内的远程抄控。

参考文献:

- [1] 徐昊,刘友安.电能计量与远程抄表应用研究[J].华中电力,2010,23(4):72-75.
- [2] 罗志华,熊兴中,袁文林.基于电力载波通信的智能家居远程控制技术研究[J].电子设计工程,2015(6):153-155.
- [3] 洪为伟,徐政.电力载波多联机空调通信系统的设计与开发[J].计算机应用,2016,36(8):2187-2191.
- [4] 王华平.基于电力载波通讯的自动抄收水表系统设计[J].自动化与仪器仪表,2007(5):52-53.
- [5] 徐伟,王斌,姜元建.低压电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J].电测与仪表,2010,47(S2):44-47.
- [6] 戚佳金,刘晓胜,张良.一种低压配电网电力线载波通信网络中继算法[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):73-78.
- [7] 吴兆平,杨俊杰,高聪慧,等.低压电力线载波通信路由算法研究[J].电测与仪表,2015,52(12):108-112.
- [8] 宋涛,蒋伟,赵勤学.低压配电网电力线载波通信路由算法研究[J].科学技术与工程,2016,16(2):169-173.
- [9] STMicroelectronics. STM32F103 devices[EB/OL].[2017-11-28]. <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f103.html?querycriteria=productId=LN1565>.
- [10] 孙启富,孙运强,姚爱琴.基于 STM32 的通用智能仪表设计与应用[J].仪表技术与传感器,2010(10):34-36.
- [11] 孟珺遐,朱宁辉,白晓民,等.基于 DL/T645-2007 协议的智能电表嵌入式通信软件研发[J].电网技术,2010,34(9):7-12.
- [12] 田霆.基于 PowerPC 的电力载波路由器的实现[D].南京:南京邮电大学,2011:16-19.
- [13] 闻达,杨诗蝶,李明齐.基于 RTX 的高速实时数据采集系统[J].仪表技术与传感器,2017(7):84-87.
- [14] 田彦云,黄向华. RTX 和 TM4C 微控制器的扭矩加载控制器设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2015,15(11):48-51.

(特约编辑:黄家瑜)