

基于 LwIP 的煤矿井下网络 多媒体通信系统设计

唐佳林^{1,2}, 于文俊^{1,2}, 王俊年^{1,2}*, 肖连平³

(1. 湖南科技大学 物理与电子科学学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 智能传感器与新型传感材料湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
3. 湘潭市恒欣实业有限公司, 湖南 湘潭 411300)

摘要:针对现有井下通信设备不成体系, 通用性不强的问题, 提出一种基于 LwIP 协议的应用层通信协议, 并基于该应用层协议设计一种以 ARM 芯片为核心的数字多媒体通信系统。首先介绍系统使用的硬件设备, 然后展示软件功能和上位机软件, 其中详细阐述基于 LwIP 协议栈的应用层设计思路, 最后设计试验进行系统测试。经试验测试表明: 所提出的应用层协议可以达到设计的功能和性能要求; 同时, 所设计的系统与现有的通信设备在功能上相比, 升级对讲功能为实时通话功能, 增加视频传输功能和上位机控制, 增强了实用性且更方便统一管理。

关键词: 数字网络; 矿用; 通信系统; LwIP

中图分类号: TD65 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2023)02-0073-06

Design of Underground Coal Mine Network Multimedia Communication System Based on LwIP

TANG Jialin^{1,2}, YU Wenjun^{1,2}, WANG Junnian^{1,2}, Xiao Lianping³

(1. School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Sensors and New Sensing Materials, Xiangtan 411201, China;
3. Xiangtan Hengxin Industry Co., Ltd., Xiangtan 411300, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing downhole communication equipment is not systematic and universal, this paper proposes an application layer communication protocol based on LwIP protocol, and designs a digital multimedia communication system based on this application layer protocol with ARM chip as the core. First of all, the hardware equipment used in the system is introduced, then shows the software functions and the upper computer software, which elaborates the application layer design ideas based on the LwIP protocol stack, and finally designs experiments for system testing. The experimental test shows that the application layer protocol proposed in this paper can meet the designed functional and performance requirements, and at the same time, the system designed in this paper upgrades the intercom function to real-time call function, increases the video transmission function and the upper computer control compared with the existing communication equipment in terms of function, which enhances the practicality and is more convenient for unified management.

Keywords: digital network; mine; communication system; LwIP

作为煤矿“应急避险”六大系统之一的井下通信系统^[1], 对于实时调度矿下人员工作、提升作业效率以及保证井下人员的安全生产有着重要意义。传统的矿下通信方式采用的是电话系统, 语音信息由模拟信

号传输,但矿井下面环境复杂,常常会对通话质量造成很大的影响.目前,主流通信技术是通过网络传输的数字语音广播对讲系统,与传统的电话系统相比,数字传输系统具有抗干扰能力强、传输距离远的特点^[2];在功能方面,除了能实现原有传统电话系统的功能外,还具有广播扩音、系统时间、定时播放、紧急广播以及优先对讲等功能.

本文基于开源轻量级网络协议栈(Light weight TCP/IP, LwIP)设计一款数字语音广播实时通话系统.整个系统分为 2 个部分,分别是由井下人员使用的嵌入式设备和由地面管理人员使用的控制台软件.嵌入式设备的硬件部分以 ARM 架构的芯片为核心,驱动部分基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 嵌入式操作系统开发,所有的通信功能基于 LwIP 协议栈实现.为确保电气设备在矿下安全使用,还额外设计本质安全型^[3]电源模块为嵌入式设备提供能源.控制台软件是以 C# 语言开发的适用于 Windows 平台的应用程序.整个系统可实现拨号呼叫、实时通话、数字音频传输、广播扩音以及监控功能.系统支持 8 khz 采样的通话信息,MP3, WAV 等多种格式的音乐下载与播放,同时支持 7.5 FPS, 1 600×1 200 分辨率的视频传输,在矿井人员调度、安全生产以及应急避险等方面可以起到极为关键的作用.

1 系统总体方案

总体系统包含部署在井下的嵌入式硬件设备和地面控制台的管理软件,所有的设备通过交换机互相连接.井下使用的硬件设备根据通话和广播扩音 2 种功能分为通话板块和音响板块,整个煤矿网络通信系统的整体方案如图 1 所示.

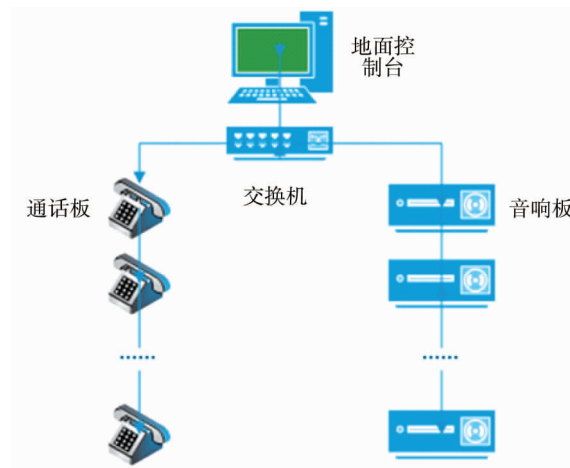


图 1 系统总体方案

2 硬件系统设计

2.1 硬件设计

硬件系统的 2 种板块都以 ARM 架构的嵌入式处理芯片为核心,通话板块的处理器为 STM32F407ZET6,音响板块的处理器为 STM32F103VET6.2 种板块的主要模块如图 2 所示.

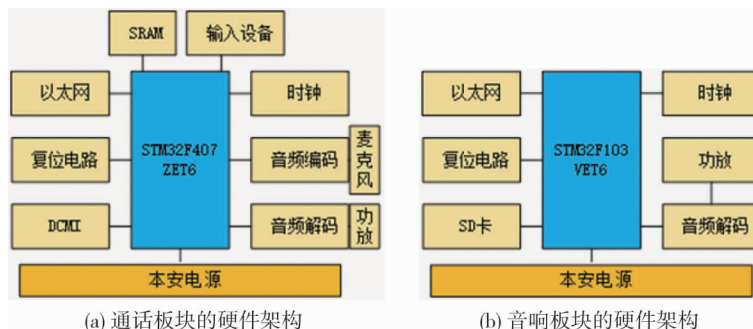


图 2 系统硬件架构

音响板块的 SD 卡支持 SDIO 协议与主控芯片连接,网络芯片为自适应 10/100 M 的 MAC 与 PHY 层

结合芯片 DM9000; 通话板块的输入设备为 3×5 的数字键盘, 网络芯片为自适应 10/100 M 的 PHY 层芯片 LAN8720. 摄像头为 OV2640, 音频编解码芯片均为 VS1053B.

模块中的本安电源即为本质安全型电源, 根据国家标准方法^[3]设计, 核心部件为 HXYP002 电子变压器, 防止设备在煤矿井下的易燃易爆环境中电火花起火, 确保矿下人员的安全生产.

2.2 软件设计

考虑低端嵌入式设备的内存资源有限和实际应用成本, 硬件系统的驱动软件设计应具有轻量化和易维护的特点, 因此, 本文设计的软件的总体框架如图 3 所示. 整个软件系统基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 嵌入式操作系统开发, 各个进程相互独立, 分别实现不同功能. 网络广播进程和网络电话进程负责各个设备之间的音频数据通信, 所有的网络传输进程都基于 LwIP, 流媒体播放进程负责音频数据的处理, 网络摄像头进程负责视频采集与发送, 管理进程负责执行控制台下发的指令. 嵌入式文件系统 (FATFs) 仅在音响板块使用, 负责管理控制台发送的歌曲及录音文件.

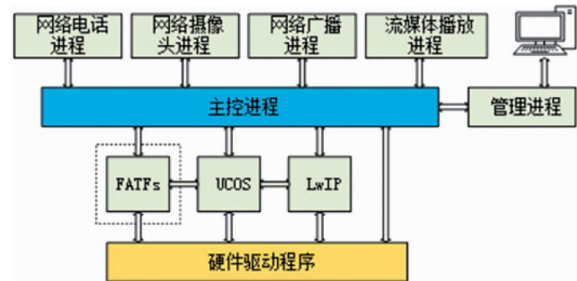


图 3 系统软件框架

2.2.1 LwIP 协议

LwIP 是由瑞典皇家计算机学院开发的一款开源的、轻量级的 TCP/IP 协议栈, 其现有的版本支持 TCP, UDP, ARP, ICMP, IGMP, PPP, HTTP, IP, DHCP, DNS, AUTOIP 等多项协议, 应用层提供类 Socket API 接口^[4]. 与 TCP/IP 协议不同的是, LwIP 有一套独特的数据包和内存管理系统^[5], 在一些情况下甚至不需要依赖底层操作系统就可以运行, 因此只需要几十 KB 的 ROM 和十几 KB 的 RAM 就可以实现联网通信功能; 在移植方面上, 仅需要使用头文件的定义, 自行完成硬件的网卡驱动程序以及操作系统模拟层文件 sys_arch.c 和 sys_arch.h 的编写就可以移植使用^[6].

LwIP 协议栈的分层思想和一般的 TCP/IP 协议栈类似, 主要分为网络接口层、网络层、传输层和应用层, 同时还有一些支持各层功能实现的附加模块, 如内存管理机制. 在所有的层次结构中, 每一层建立在低一层提供的服务上, 同时完成一个独立的通信问题. 例如, 网络接口层负责数据包在物理层面的传输和封装问题, 并将封装好的数据包交由 IP 层处理. 然而, 数据包的层层递交需要不断进行数据拷贝, 占用大量的内存资源, 所以 LwIP 设计独特的内存管理机制, 即允许协议中的每一层操作同一个内存区域. 因此在数据包的实际递交过程中, 各层只是操作数据包所在的内存区域完成相应字段的修补, 这样就极大地减少内存的开销, 同时, 因为低端嵌入式设备没有多线程运行的能力, 所以也不会出现各层同时操作同一内存地址带来的数据混乱问题.

研究表明, 将 LwIP 协议栈与 $\mu\text{C}/\text{OS}$, FreeRTOS 等嵌入式操作系统结合作为嵌入式设备联网的方案是有效的^[7-9]. 因此, 本文采用 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 嵌入式操作系统结合 LwIP 协议栈作为系统软件开发的基础.

2.2.2 通话进程设计

通话功能主要由网络通话进程与流媒体播放进程实现, 其网络交互的应用层协议基于 UDP 协议开发. 在通话过程中, 由麦克风采集的数据经语音编码芯片编码后, 递交给网络交互进程进行相应的处理等待发送, 同时网络进程还会从协议栈的接收缓冲区接收来自对方传输的语音数据包, 并通知解码进程等待进行解码播放. 数据包的格式如图 4 所示.

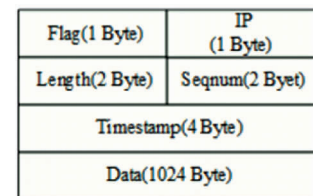


图 4 通话进程的语音数据包

Flag 表示语音数据包的来源是井下设备或是上位机管理软件; IP 表示该数据包要发送目标的 IP 地址; Length 表示数据包的总长度; Seqnum 表示当前语音数据包的序列号; Timestamp 表示当前数据包的时间戳, 时间戳采用计数的方式来设置, 即从当日 0 点至今一共经过多少毫秒; Data 是编码的语音数据.

本设计利用二维数组的方式定义一个接收缓冲区和一个发送缓冲区, 数组的行表示缓冲区可以容纳的语音数据包的个数 capacity, 列表示语音数据包的大小, 网络交互进程可直接对 2 个缓冲区进行操作. 同时, 还定义一个接收指针 RX_P 与一个播放指针 RX_N, 数据包的交互采用环回缓冲的思想, 当网络交互

进程接收到一个有效数据包并经过排序算法排序以后,接收指针加 1,直到接收指针和播放指针超过一定距离,播放指针才开始播放,总体流程如图 5 所示.

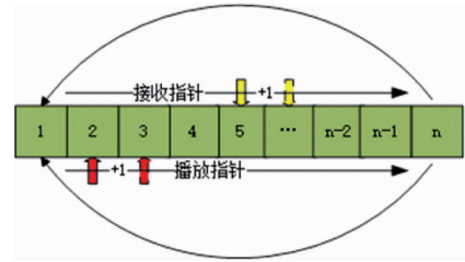


图 5 环回缓冲区

为保证通话进程的正常播放,对于每个接收的数据包都要进行排序处理,基于 Jitterbuf 思想设计的排序方法如下:取当前接收到的语音数据包的序列号记为 cur_seq ,取当前数据包的时间戳记为 $cur_timestamp$,同时,分别将收到的上一个数据包的序列号和时间戳记为 $last_seq$ 和 $last_timestamp$,判断接收到的数据包的序列号是否大于上一个包的序列号,并进行如图 6 所示的操作.

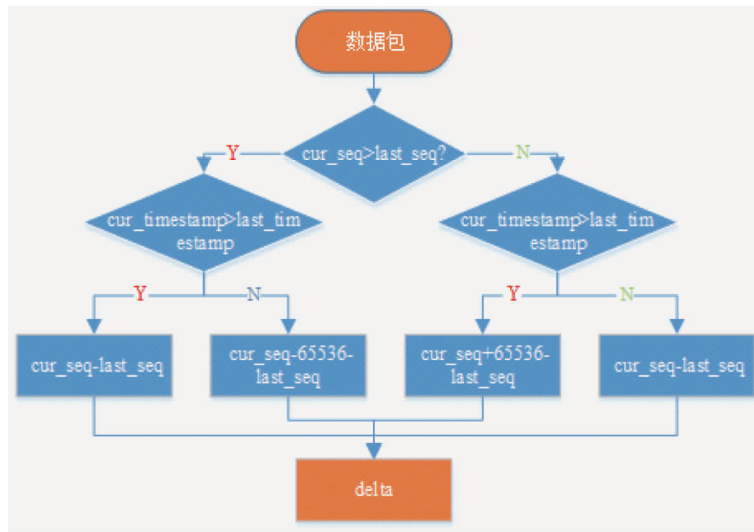


图 6 排序算法流程

如果 δ 小于 1,则可以认为收到该数据包太迟,可以丢弃.在收到有效数据包之后,需要将数据包放置到相应的位置,取上一个放置好的数据包的序列号和时间戳分别记为 $last_put_seq$ 和 $last_put_timestamp$,判断当前数据包的序列号是否大于上一个正常放置的数据包的序列号,之后进行同样的操作,最终可以得到该数据包的正确位置.即

$$position = (last_seq + \delta + capacity) / capacity. \tag{1}$$

式中: $position$ 为该数据包放在接收缓冲区的具体位置.

数据包排序正确后,接收指针加 1,当式(2)满足时,播放进程可以解码数据包并播放.

$$(RX_N + capacity - RX_P) / capacity \geq k. \tag{2}$$

式中: k 为用户设置的定值,表示可以缓冲的数据包的个数.

2.2.3 广播进程设计

广播功能主要由网络广播进程、文件管理进程以及流媒体播放进程来实现.网络交互的应用层协议基于 ICMP 协议(即组播协议)开发.数据包由上位机管理软件发送,网络交互进程从组播协议中获取数据,并递交给相应的进程进行处理.由于广播板块不需要进行语音编码与发送,因此只需定义一个接收缓冲区,定义的方法与通话功能相同,定义的数据包的格式如图 7 所示.

Flag(1 Byte)	State (1 Byte)
Length(2 Byte)	ID(2 Byte)
Seqnum(4 Byte)	
Data(1 024 Byte)	

图 7 广播功能的数据包

Flag 表示当前数据包是语音数据包还是音乐数据包;State 表示该数据包是否为本次发送的歌曲的最后一个包;Length 表示数据包的总长;ID 表示该数据包所属歌曲的索引号,每首歌曲都有一个独一无二的索引号,文件管理进程会使用该索引号存放和取出歌曲;Seqnum 表示该数据包的序列号;Data 为内容区.

对于每一个接收到的数据包,首先判断该数据包是属于语音数据还是音乐数据,如果属于语音数据,则经上一节所述的排序算法排序后递交给语音解码进程播放,否则,经排序处理之后递交给文件管理进程处理.

2.2.4 管理进程设计

管理功能主要负责与井下设备和控制台管理软件的通信.管理功能主要由驱动部分的管理进程实现,网络交互的应用层基于 TCP 协议开发,以此确保上位机与井下设备连接的可靠性和稳定性.当网络交互进程接收到来自上位机管理软件的特殊指令后,经管理进程解析并递交给对应的进程处理,完成上位机对井下设备的管理.指令的数据包格式如图 8 所示.

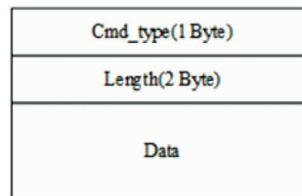


图 8 指令数据包结构

Cmd_type 表示指令类型;Length 表示数据包的总长度;Data 为指令内容,不同的指令长度不同.部分指令的类型和相应的功能如表 1 所示.

表 1 指令类型和相应功能

指令类型	功能
心跳指令	确保井下设备与上位机时刻处理连接状态
时间戳	负责更新井下设备的时间戳
通话指令	负责管控井下设备的通话状态
IP 列表	负责为井下设备分配 IP 地址、修改 IP 地址
紧急广播	其余功能禁止,只保留广播扩音
重置指令	重启井下设备,防止程序跑飞

2.2.5 摄像头进程设计

视频功能主要由网络摄像头进程实现,网络交互的应用层协议基于 TCP 协议开发.由于传输的数据量巨大,需要用到 MCU 的 DMA 双缓冲功能.应用层中定义 2 个发送缓冲区,摄像头采集的数据由 DCMI 流出,DMA 负责将数据从 DCMI 搬运到内存,当 DMA 的一个缓冲区满之后,即开启中断将数据引到下一个缓冲区.由于 DMA 不占 CPU 资源,可极大地缓解软件进程的压力,网络进程只需持续打包发送缓冲区内数据,由上位机根据数据帧头帧尾解析播放,实现视频传输功能.

2.3 控制台管理软件

上位机管理软件是由地面人员使用,负责与井下设备的交互.在功能方面,涵盖上述的所有功能.软件基于 VScode2019 开发,编写语言为 C#,适用于 Windows 平台.软件后端功能齐全,有对应的日志、数据库以及登录管理界面,只有授权人员才可以登录系统进行管理,同时软件还支持外网人员远程登录对井下设备进行间接管理.软件的主界面如图 9 所示:总控室显示在线的设备列表;对话查看可以查看近期的通话记录;实时任务负责音乐的传输;系统设置中可以修改井下设备的分区,IP 地址等.



图 9 上位机软件主界面

3 系统测试

为检验系统的可行性与有效性,分别对井下设备进行网络传输测试、通话时长压力测试以及视频传输测试.测试环境为公网环境,模拟井下网络通信的复杂状态.

网络传输测试包括 PING 测试、UDP 环回测试和 TCP 环回测试.PING 测试由 LwIP 协议栈支持,测试报文长度为 32 Byte;UDP 环回测试基于自行设计的应用层协议进行,设备接收到来自上位机的数据包并将数据包返回给上位机,测试报文长度为 1 024 Byte;TCP 环回测试同样基于自行设计的应用层协议进行,设备接收到来自上位机的数据并返回给上位机,测试报文长度为 1 024 Byte.测试结果如表 2 所示.

表2 网络传输测试

测试	次数	丢包/个	最大延时/ms	平均延时/ms	速率/(KB/s)
PING	10 000	0	3 901	64	2 500
UDP	10 000	0	64	64	900
TCP	10 000	0	18	10	1 200

由于测试处于公网环境下,网络的吞吐受到一定影响,但是最大速率仍可以满足通信要求,同时在UDP通信测试中,模拟了等待语音数据编码完毕再发送的情况,所以具有固定的延时.通话压力测试分别测试在不同的通话时长下,设备的状态,丢包情况等,测试结果如表3所示.

表3 通话时长压力测试

时长/s	速率/(KB/s)	丢包/个	状态
300	16	0	正常
3600	16	2	正常
36 000	16	201	正常

从表3可以看出:在公网环境和长时间的通话测试下,设备虽然有一定的丢包数量,但是通话状态却没有受到较大的影响,具有一定的稳定性.

视频传输测试主要进行不同环境下的视频传输,视频帧大小为1 600×1 200,测试时长为5 min,测试结果如表4所示.

表4 视频传输测试

环境	时长/s	帧大小/Byte	速率/(KB/s)	平均帧率/FPS
空间	300	78 621	582	7.5
人脸	300	72 456	524	7.5

在不同环境下,视频的帧数基本稳定在7.5 FPS,网络的速率也达到了近600 KB/s,可以实现视频功能.

4 总结

本文提出一种基于LwIP协议的应用层通信协议,并基于该协议设计一种矿用数字多媒体网络通信系统.本文提出的应用层协议以8 KB左右的内存占用实现了井下低端嵌入式设备之间的数字多媒体通信,且通信速率满足实际使用需要;同时,该协议中的数据包排序方法也可以缓解UDP传输过程中出现的数据包乱序情况.因此,本文的研究对工业级低端嵌入式设备的因特网连接具有参考价值.然而,受限于设备有限的资源,本文设计的通信协议没有对网络传输过程中丢包的情况建立重传机制,因此后续的研究会关注于以更少的资源实现乱序重排和丢包重传机制.

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿井下安全避险“六大系统”建设完善基本要求及检查验收暂行办法[EB/OL].[2011-05-16].<http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/.../1422523030.doc>.
- [2] 包建军,徐炜,罗克.基于LWIP的煤矿数字语音对讲终端的设计[J].工矿自动化,2011,37(12):11-14.
- [3] 全国信息与文献标准委员会.爆炸性环境第4部分:由本质安全型“i”保护的设备:GB/T 3836.4—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [4] 朱升林,欧阳俊.嵌入式网络那些事——STM32 物联实战[M].北京:中国水电水利出版社,2015.
- [5] 徐健,孙庆.LwIP协议栈的pbuf结构探索与研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2018,18(2):14-17.
- [6] 武振斌.基于uC/OS-II与LwIP的嵌入式网络操作系统的移植与实现[D].苏州:苏州大学,2014.
- [7] 刘培刚,杜靖中.基于μC/OS-II和LwIP嵌入式设备以太网通信研究与实现[J].电子设计工程,2017,25(16):129-133.
- [8] 杨继森,李路建,邵争光,等.基于μC/OS-III和LwIP时栅位移传感器多模式网络接口设计[J].测控技术,2019,38(7):119-124.
- [9] 杨佳杰.基于LwIP协议栈的嵌入式远程监控系统设计[D].上海:上海交通大学,2019.