Journal of Computer Applications
计算机应用,2015,35(10):3000 - 3003
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2015-10-10
http://www.joca.cn

文章编号:1001-9081(2015)10-3000-04
doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2015.10.3000

基于 ZigBee 和以太网的振动检测系统

曹梦超*,刘 华
(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)
(*通信作者电子邮箱 caomengchao@sjtu.edu.cn)

摘 要:针对传统振动检测系统中组网能力弱、通信速率低等问题,设计了一种基于 ZigBee 和以太网传输的振动检测系统。系统具有三层结构,测量节点 N 与路由节点 R 之间采用基于 XBee-PRO 的 ZigBee 方案构建通信网络,以适应多测点和大空间分布的应用场合;路由节点 R 与用户终端层采用基于 LwIP 的以太网方案完成通信,以保证数据实时、可靠地传输;用户终端层的服务器节点 S 将数据暂存在 SD 卡中,供 PC 端读取分析。实验结果表明,这种三层结构的测量方案能充分发挥 ZigBee 的分布式组网优势和以太网的高速稳定优势,既实现对振动检测系统中测量点的有效控制,又满足测点广泛分布和数据实时传输的需求。

关键词:振动检测;ZigBee;以太网;XBee-PRO;LwIP
中图分类号: TN919.71; TN919.72 **文献标志码**:A

Vibration measurement system based on ZigBee and Ethernet

CAO Mengchao*, LIU Hua
(*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: In the traditional method of vibration measurement system, the ability of the network construction is weak and the transmission rate is slow. In order to solve these problems, a new kind of vibration measurement was designed using ZigBee and Ethernet. There are three layers in the system. ZigBee based on XBee-PRO was used to establish the communication between collector nodes and router nodes to suit the multipoint and long-span measurement. Ethernet based on LwIP was used to make the data transmitted accurately in real-time. On the end device layer, the data were stored in SD-card in a server node and offered to computers. The experimental results show that the three layers structure of the measurement system combines the strength of ZigBee's network construction ability and Ethernet's high speed and good stability. It can not only realize an effective control to the measure points, but also meet the requirements of a long-span measurement and a real-time data transmission.

Key words: vibration measurement; ZigBee; Ethernet; XBee-PRO; LwIP

0 引言

振动检测系统广泛应用于道路桥梁、工业过程、旋转机械、大型能源设备等的监测,保证了工业生产和日常生活的顺利进行。由于振动检测系统往往应用于大型工业现场,因而具有测点数目众多、空间分布广泛、数据实时性高等特点,这就需要有合适的通信网络来保证测量数据及时有效的传输[1]。在现有的振动检测系统中,或是只具有无线或有线功能[2-5],不能灵活应用于不同场景;或是没有将两种通信方式有效地结合起来,充分利用有线的带宽与无线的空间组网能力[6-7]。基于此,本文重点研究了振动检测系统中数据通信的特点,采用 ZigBee 和以太网的综合组网方式,设计了多层级的采集通信网络,保证现场测试高效稳定地进行。

1 振动检测系统通信网络结构

振动检测系统主要由传感器、信号采集调理、信号传输、信号显示及处理、反馈控制等单元组成,待测量主要包括应力、应变、扭矩、位移、压力等,传感器与系统的连接主要采用全桥、半桥和 1/4 桥等方式。

本文提出的振动检测系统通信网络为三层结构(图 1),通信网络由底层采集节点 N(简称 N 节点)、中间层路由节点 R(简称 R 节点)和最上层用户终端构成,用户终端包括服务器节点 S(简称 S 节点)和 PC 端。N 节点通过 AD 和信号调

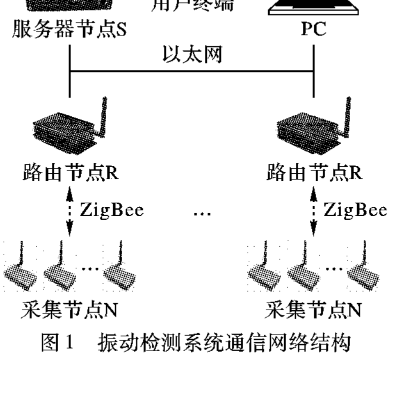


图 1 振动检测系统通信网络结构

收稿日期:2015-05-04;**修回日期**:2015-06-25。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(31271069, 30800235);上海交通大学医工(理)交叉研究基金资助项目(YG2013MS24)。
作者简介:曹梦超(1991 -),男,山西朔州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感网络、嵌入式系统; 刘华(1974 -),男,重庆人,副教授,主要研究方向:机器人、微机电系统、仿生机械。

理电路,与前端传感器相连,获取实时的传感数据;R 节点通过 ZigBee 与多个 N 节点相连,向 N 节点发送采样控制指令,同时获取各采集节点 N 的传感数据,暂存在 SD 卡中或向 S 节点转发;S 节点通过以太网与多个 R 节点和 PC 相连,保证数据和控制指令的双向传输。

2　节点 N 与节点 R 之间的通信方案设计

采集节点 N 与路由节点 R 之间使用 ZigBee 完成连接(见图 2)。ZigBee 是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗局域网协议,是一种短距离、低功耗的无线通信技术,其优点在于强大的组网能力。ZigBee 无线设备工作在 868 MHz、915 MHz 或 2.4 GHz频段,最大传输速率 250 Kb/s。应力应变的测试场合中对于测点组网、通信距离和数据传输的可靠性都有较高的要求。但是通常而言,ZigBee 的通信范围都比较近,例如 Chipcon 公司的 CC2420 芯片,仅能够工作在可视距离 80 m 以下[8];又如 TI 公司的 CC2530 芯片,有效通信范围为 10 ~ 100 m[9]。本文方案选择 Digi 公司的 XBee-PRO 模块来完成 ZigBee 的组网。XBee-PRO 支持标准的 ZigBee RPO 协议,具有 UART 和 SPI 两种接口,在室外可视条件下,通信距离可达 3.2 km,连续工作不断网,抗干扰能力强。

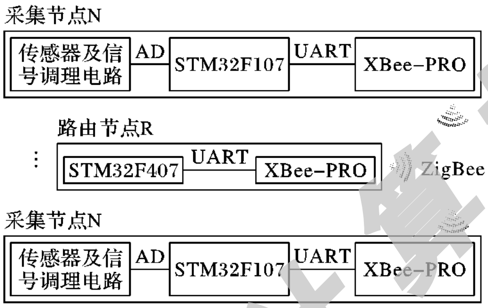


图 2　采集节点 N 与路由节点 R 通信方案示意图

单个 R 节点与多个 N 节点组成了一个基本的测量单元。为了保证通信过程能够最大限度地使用 XBee-PRO 提供的带宽,这里采用星型网络来完成组网,R 节点对应的 XBee-PRO 为协调器,N 节点对应的 XBee-PRO 为终端节点,控制器与 XBee-PRO 之间采用 USART 连接。根据测试结果,在波特率为 115 200 Bd/s 时 XBee-PRO 能够实现稳定与高效率的传输[10]。R 节点控制器采用 STM32F407,其内核为 ARM 32-bit Cortex-M4;N 节点控制器采用 STM32F107,其内核为 ARM 32-bit Cortex-M3。

2.1　XBee-PRO 命令配置

XBee-PRO 通过 USART 接收来自 PC 端配置软件 X-CTU 或微控制器的配置信息,完成初始化配置、数据传输、状态切换等功能。配置信息的格式包括 AT 命令方式和 API 方式,本文采用 API 方式对 XBee-PRO 进行配置。API 的帧结构见图 3[11],API 命令和实际传输的数据包含在 Frame Data 中。

Start Delimiter (1 B)	Length (2~3 B)		Frame Data (4~n B)	Checksum (n+1 B)
0X7E	MSB	LSB	APIStructure	1 B

图 3　XBee-PRO 模块中 API 命令的帧格式

2.2　组网与数据通信

在组网过程中,R 节点首先配置对应的 XBee-PRO 为协调器,协调器启动后,会对通信信道、16 位 PAN ID 和 64 位扩展 PAN ID、安全策略等作出选择,同时决定是否允许路由器或终端节点加入。通过 NJ 命令可以配置 XBee-PRO 的协调器在一定时间内允许终端节点加入,组成一个星型网络。在上述时间内,启动各 N 节点对应的 XBee-PRO 并配置为终端节点,即可完成自组网过程。自组网后,协调器获取星型网络对应节点的地址列表,并在 R 节点的微控制器上维护该列表。

为了保证数据通信的可靠性,本文采用轮询方式来完成 R 节点与 N 节点之间的数据通信。协调器在恒定的时间内,对终端节点列表中的地址进行循环访问,发送数据请求信息。终端节点收到对应的数据请求信息后,将采集到的传感器数据打包,发送到对应的协调器。XBee-PRO 支持网络层的分包机制,一帧最大可发送 255 B 的长度。

2.3　采集节点 N 与路由节点 R 通信算法

N 节点控制器 STM32F107 上电后初始化时钟、USART、AD 等模块,通过 USART 配置所连接的 XBee-PRO 为 ZigBee 终端节点,随后进入主循环,等待 R 节点发送采样命令。R 节点上电后,同样初始化 USART,利用 USART 将 XBee-PRO 配置为 ZigBee 协调器。协调器启动后,为 ZigBee 网络分配 PAN ID,为各终端节点分配网络地址。ZigBee 自组网完成后,由 R 节点对接入的 N 节点轮询发送采样命令,N 节点收到命令后执行采样,再将 AD 数据通过 ZigBee 发送到 R 节点。整个通信过程中,R 节点为命令发起点,N 节点在等待命令与执行命令的过程中循环。N 与 R 通信过程的通信算法流程见图 4。

图 4　N 节点与 R 节点通信算法流程

3　节点 R 与节点 C 的通信方案设计

R 节点的微控制器采用 STM32F407,其内部集成了以太网 MAC 控制器,符合 IEEE802.3-2002 标准的以太网 MAC 协

议,可以通过外接的 PHY 接口支持 10/100 Mb/s 的数据传输,模块内部还有一个 2 KB 的传输 FIFO,可配置经过优化的直接存储器访问(Direct Memory Access,DMA)功能,保证了数据稳定、高速的传输。在 R 节点上,移植了 LWIP 协议栈来实现以太网功能。LwIP 是瑞典计算机科学院的一个开源的轻量级 TCP/IP 协议栈,其实现的重点是在保持 TCP/IP 现有主要功能的基础上,又能保证协议栈对处理器资源的有限消耗,其运行一般只需要几十 KB 的 RAM 和40 KB左右的 ROM,适合在低处理能力的微控制器上使用[12]。

3.1 LwIP 协议栈简述

本文方案中移植的 LwIP 协议栈版本为 1.4.2,该协议栈提供三种用户编程接口方式:raw/callback API、sequential API、BSD socket API。其中 raw/callback API 不需要处理器运行操作系统,主要通过回调函数机制实现,即用户向内核注册回调函数,通过直接调用内核 UDP 或 TCP 相关操作函数来完成应用程序的编写。这种方式没有明确规定用户编程的步骤及规则,具有高效率、高灵活度的特点。Sequential API 和 BSD socket API 实现过程中遵循了一套简单的编程步骤和规则,可以提高应用程序的开发效率,但是应用程序进程和协议栈内核进程之间会出现数据拷贝的情况,造成资源上的浪费,降低运行效率[13]。本文方案选择 raw/callback API。

3.2 底层驱动的实现

STM32F407 中集成以太网 MAC 控制器,本文通过外接美国国家半导体公司的 DP83848 芯片作为 PHY 控制器,实现以太网通信的硬件设计,采用 RMII 模式实现物理层连接。底层网络驱动的框架已经由 LwIP 协议栈实现了大部分,LwIP 协议栈的底层驱动框图如图 5 所示。为了提高网络运行效率,底层配置采用 DMA 实现数据转移,利用中断的方式与应用层连接。

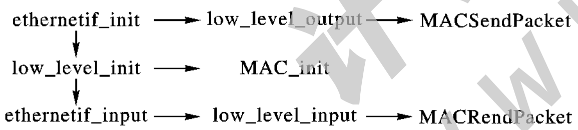


图 5 LwIP 底层驱动结构

3.3 数据传递的实现

LwIP 或 TCP/IP 协议的本质是对数据包的管理和传递。链路层判断收到的数据包类型,提取数据字段,记录主机物理地址信息;IP 层根据数据包中的 IP 地址实现数据的存储、转发,根据编号实现数据包的重装,向上层递交数据包;TCP 提取数据包中的信息,更新状态机,向应用程序提供数据等。在采用 raw/callback API 编程时,数据包结构对各层都是可读可写的,各层共用数据包资源而不需要进行重新的创建和复制。

在 LwIP 协议栈的移植中,数据在 IP 和 TCP 层的传递是需要实现的主要内容。数据上行时,网络接口将数据包传递给 IP 层,IP 层将数据包传递给 TCP 层;数据下行时,数据包则逆向传递,这个传递过程见图 6。

在数据接收过程中,网络接口层收到数据后,根据报头相关字段的不同分发给 IP 或 ARP 模块处理,分发给 IP 模块是通过调用函数 ip_input 完成的。函数 tcp_input 对接收到的数据报进行判断、分片等工作,之后传递至各个 TCP 控制块。LwIP 中的 TCP 层提供一系列机制来保证它的可靠性,例如确认应答、超时重传、拥塞处理机制等。在数据发送过程中,应用程序主要调用函数 tcp_output 和 ip_output,根据目的 IP 地址为数据报选择一个合适的网络接口,然后调用函数 ip_output_if 将数据报发送出去。函数 ip_output_if 在发送数据报时需要考虑数据报分片的问题,如果数据报总长度大于网络接口的 MTU,则通过分片函数 ip_frag 来实现 ip 分片。分片后,数据报进入网络接口层,通过函数 netif→output 发送[14]。

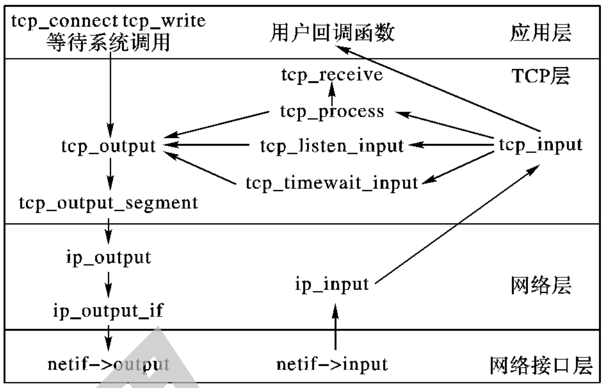


图 6 LwIP 协议栈中数据传递示意图

3.4 路由节点 R 与用户终端拓扑结构

本文利用 LwIP 在路由节点与用户终端实现以太网通信,服务器节点 S、PC 端和多个 R 节点通过交换机相连。节点 S 作为以太网服务器,PC 端和 R 节点作为客户端。在交换机网络中,各节点的 IP 地址位于同一网段,利用事先分配好的 IP 地址和端口号进行通信,总体网络拓扑见图 7。

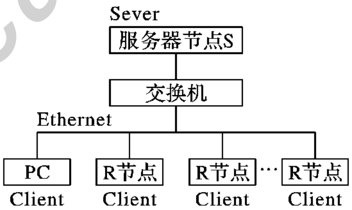


图 7 R 节点与用户终端的通信网络

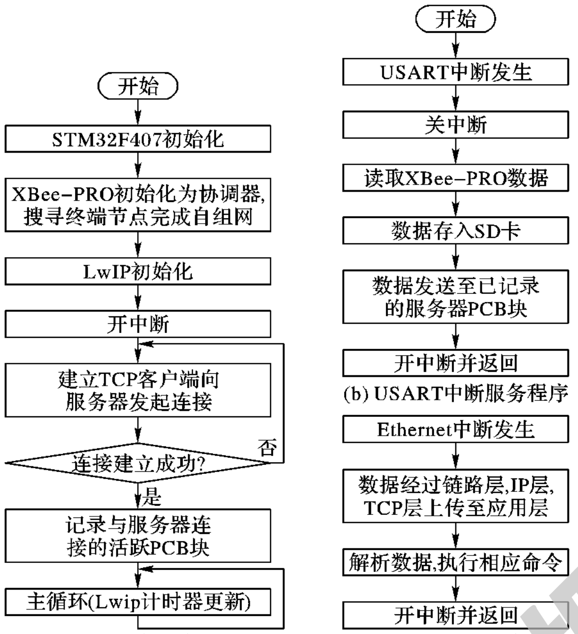
在 R 节点上,通过 LwIP 协议栈建立客户端,发起三次握手连接,连接成功后,保存与服务器配对连接的进程控制块(Process Control Block, PCB)。这个 PCB 存在于活跃的 PCB 队列中,其中保存着对应服务器的 IP 地址和端口等信息。R 节点中 USART 中断发生时,表明有来自 N 节点的数据通过 XBee-PRO 模块进入到 R 节点,此时读取 USART 的缓冲区,将数据打包发送至服务器。如果产生 Ethernet 中断,表明有数据或命令从服务器节点 C 发送至 R 节点,R 节点需要对数据或命令进行解析,作出响应。图 8 展示了 R 节点上 USART 中断服务程序和 Ethernet 中断服务程序算法流程,实现与 R 节点和 N 节点的通信。

4 实验与分析

按照上述硬件和软件的设计方案搭建振动检测系统的测试平台,平台中包含 1 个服务器节点 S,1 个路由节点 R 和 2 个采集节点 N,N 节点采用 24 位 AD 连接单轴加速度传感器。集成了单轴加速度传感器的 N 节点和 R 节点实物见图 9。

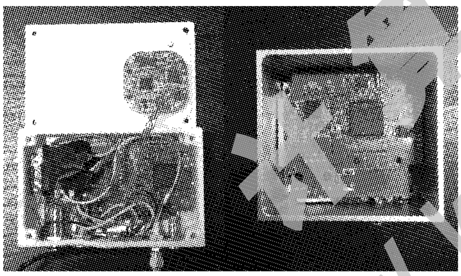
本文研究的振动测量系统在某建筑场合中进行模拟振动测量,采样率为 5 ksps,传输的数据包括采样值和时间信息。实验中 N 节点与 R 节点通信距离为 500 m,R 节点、S 节点与 PC 用网线连至同一交换机。两个 N 节点的数据由同一个 R 节点的 XBee-PRO 接收,通信速率为 40 Kb/s。R 节点通过以

太网将数据实时传输到 S 节点,并存入 S 节点的 SD 卡中。PC 端通过以太网将 S 节点的数据读取出来,利用 LabVEIW 作出跟踪曲线。两次不同方向的测量得到的加速度曲线见图 10。实验结果表明,上述通信网络能够满足振动测量系统对通信速率和通信距离的要求。



(a) 主程序　(b) USART中断服务程序　(c) Ethernet中断服务程序

图 8　R 节点算法流程



(a) N节点　(b) R节点

图 9　N 节点与 R 节点实物图

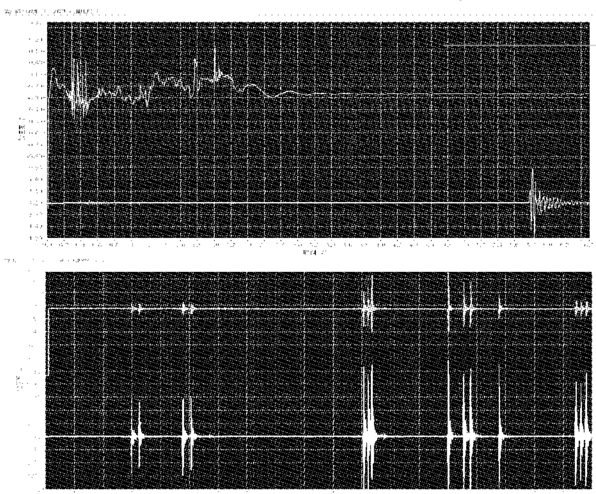


图 10　加速度实时曲线

5　结语

本文设计了一款基于 ZigBee 和以太网通信的振动检测系统,针对工业环境测点分布灵活、实时性高等要求作出了相应的设计。重点研究了 XBee-PRO 和 LwIP 在工业组网中的应用,并将二者有机地结合起来。实验结果表明,两种组网方式在实际测量中协调工作,取得了较为满意的结果。

参考文献:

[1] ZHANG Q. Conception of long span bridge health monitoring and monitoring system design [J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(1): 65 -69. (张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报, 2001, 29(1): 65 -69.)

[2] LYNCH J P, LOH K J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring [J]. Shock and Vibration Digest, 2006, 38(2): 91 -130.

[3] LIU Z, YU Y, LIU G, *et al.* Design of a wireless measurement system based on WSNs for large bridges [J]. Measurement, 2014, 50(2): 324 -330.

[4] HONG Y, ZENG J, KAN Y, *et al.* A real-time vibration frequency measurement system of bridge pier [J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2014, 7(6): 123 -132.

[5] GANGONE M V, WHELAN M J, JANOYAN K D. Wireless monitoring of a multispan bridge superstructure for diagnostic load testing and system identification [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2011, 26(7): 560 -579.

[6] KHANDANI M K, AHDI F, MIRBAGHERI A, *et al.* Engineering asset management — systems professional practices and certification [C]// Proceedings of the 8th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2013) & the 3rd International Conference on Utility Management & Safety (ICUMAS). Berlin: Springer-Verlag, 2015: 661 -671.

[7] CHEN S, CERDA F, RIZZO P, *et al.* Semi-supervised multiresolution classification using adaptive graph filtering with application to indirect bridge structural health monitoring [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(11): 2879 -2893.

[8] GUMMESON J, GANESAN D, CORNER M D, *et al.* An adaptive link layer for range diversity in multi-radio mobile sensor networks [C]// INFOCOM 2009: Proceedings of the 2009 International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 154 -162.

[9] YUE X, LIU Y, WANG Y, *et al.* Parking guidance system based on ZigBee and geomagnetic sensor technology [J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(3): 884 -887. (岳学军, 刘永鑫, 王叶夫, 等. 基于 ZigBee 与地磁传感技术的停车诱导系统[J]. 计算机应用, 2014, 34(3): 884 -887.)

[10] PIYARE R, LEE S. Performance analysis of XBee ZB module based wireless sensor networks [J]. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2013, 4(5): 1615 -1621.

[11] XBee/XBee-PRO RF Modules 802. 15. 4 product manual [EB/OL]. [2015-05-02]. http://ftp1. digi. com/support/documentation/90000982_S. pdf.

[12] DUNKELS A. Design and implementation of the lwIP TCP/IP stack [EB/OL]. [2014-10-10]. http://citeseerx. ist. psu. edu/viewdoc/download?doi = 10. 1. 1. 109. 1795&rep = rep1&type = pdf.

[13] KYUSAKOV R, ELIASSON J, DELSING J, *et al.* Integration of wireless sensor and actuator nodes with IT infrastructure using service-oriented architecture [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 43 -51.

[14] CHEN W, QIU S. The porting and implementation of light-weight TCP/IP for embedded Web server [C]// WiCOM 2008: Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1 -4.