

基于 Wireless USB 的无线传感器网络节点设计*

宋晓鸥

(中国人民武装警察部队工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710086)

摘要: 在研究 2.4G 技术的基础上, 分析了 Wireless USB 技术应用于无线传感器网络领域的技术优势, 并以此为平台, 以通用 MCU 为处理器, 基于软件无线电理念分别设计制作了传感节点和 Sink 节点。软件设计依托认知无线电技术组建分簇型结构网络, 并在安全机制、抗干扰机制和低功耗方面作了深入研究, 经调试系统达到了设计指标。

关键词: 无线传感器网络; Wireless USB; 2.4G; 分簇型结构网络

中图分类号: TP368.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)19-0061-05

Design of wireless sensor network node based on wireless USB technology

Song Xiao'ou

(Department of Information Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: Based on the research of 2.4G technology, the advantage of applying wireless USB in the wireless sensor network field is analyzed. Then, Cypress wireless USB hardware platform and MCU processor is applied in designing the sensor node and Sink node, which grounded on software radio. What's more, a dividing cluster network is constructed relying on cognitive radio. At last, the paper lucubrates the security, anti-jamming and low energy consumption of the network. System tests prove that it achieves demand.

Key words: wireless sensor network; Wireless USB; 2.4G; dividing cluster net

无线传感系统较有线传感系统有易于部署、易于扩展等优势, 为此, 人们开发了多种无线传感器网络。常用的无线通信技术有红外技术、普通射频技术(RF)、2.4G 技术等。红外技术操作简单、价格低廉, 但存在直线对准通信、单向通信、高功耗等缺点, 不适合开发传感器网络。射频技术可轻松突破上述局限, 与其他射频频段相比, 2.4G 技术具有频段免费、全球通用、设备体积小、数据传输率高、抗干扰能力强、低功耗等优点, 在开发无线传感器网络方面有巨大优势, 目前较成熟的 2.4G 无线传感系统是基于蓝牙技术(Bluetooth、IEEE 802.15.1)和 ZigBee 技术(IEEE 802.15.4)的^[1]。

与传统的以电缆和红外方式传输测控数据相比, 在测控领域应用蓝牙技术主要有抗干扰能力强、节省成本、无方向限制、可实现多个设备互通等优势, 但蓝牙的同步时钟对电池的使用寿命有很大影响, 且一个蓝牙主设备只能连接 7 个从设备, 限制了其应用范围。

ZigBee 依据 IEEE 802.15.4 标准, 可采用星状、片状

和网状网络结构, 由一个主节点管理若干子节点, 一个主节点最多可管理 254 个子节点, 同时主节点还可由上一层网络节点管理, 最多可组成 65 000 个节点的较大网络。但 ZigBee 复杂的协议也导致成本增加, 且 ZigBee 在稍微高速率、低延迟的应用中表现不够好, 制约了它在该领域的应用。

Wireless USB 技术是由赛普拉斯半导体公司开发的一种新型的点对点以及点对多点的 2.4 GHz 无线通信技术。该技术为这一领域的应用提供了低功耗、低延迟、低成本、高可靠性的解决方案, 具有广阔的应用前景。本文基于 Wireless USB 技术, 以“模块化、小体积、低功耗、低成本和通用性”为目标, 开发设计了嵌入式网络节点硬、软件系统, 使其满足监测任务要求的数据采集、计算、无线通信和互联能力。

1 系统构架

1.1 Wireless USB 技术简介

Wireless USB 在频段管理上把 2.4 GHz 频段分成 98 个信道, 每个信道带宽 1 MHz, 包括 26 个快速信道(切

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(6110128)

网络与通信 Network and Communication

换时间为 $100 \mu\text{s}$ ）、35 个中速信道（切换时间为 $180 \mu\text{s}$ ）、37 个慢速信道（切换时间为 $270 \mu\text{s}$ ）^[2]。该机制为实现频分多址、跳频及频率捷变提供了技术基础。该技术在每一个信道上又使用了直接序列扩频（DSSS）技术，DSSS 系统的特点主要有：较强抗干扰能力；很强的隐蔽性和抗侦察、抗窃听、抗测向能力；选址能力，可实现码分多址；抗衰落，抗频率选择性能好；抗多径干扰；可进行高分辨率的测向和定位^[3]。此外，该技术还使用 GFSK 调制技术。

Wireless USB 协议层的设计采用了主-从方式的星形结构，主设备实时处于接收状态，接收来自从设备的信息，同时监视干扰状况，选择干净的频带，决定是否跳频。从设备采集并发送数据，发送结束后立刻进入睡眠状态，最大限度地节省电池电量。协议中还可实现时分双角色（既可接收，也可发射），可以作为一个类似路由器的角色使用。一个主设备可以带上百个从设备^[4]。网络 ID 是 Wireless USB 网络的标识，是 Wireless USB 网络彼此区分的依据，每个芯片在出厂时有 6 B 的 ID，此 ID 是唯一的，网络 ID 由这个芯片 ID 计算得到。相比那些没有 ID 的其他射频芯片，这无疑又是一个优点。

此外，Wireless USB 技术支持接收信号强度指示（RSSI）功能，为实现认知无线电技术提供了理论基础，可以检测复杂电磁环境的频谱空洞，提高频谱利用率^[5]。

1.2 系统结构

本文采用层次性网络结构，将整个系统分成 3 级网络。

汇聚节点（Sink 节点）与传感器节点形成一个星形网络拓扑结构，组成无线传感器网络的第一级网络，实现数据采集、实时数据报警和数据基本处理功能，并根据上级网络的通信指令完成与管理节点的数据通信。每个传感节点每隔一定时间采集多组数据，为保证数据的准确性求平均值，通过多址机制，把采集数据传输到汇聚节点。汇聚节点收到所有数据后，首先判断数据是否超出设定阈值，如果超出，则发出报警信息。当收到的数据正常时，就对数据再次累加求平均值，接收到上级网络管理节点的通信指令时，封装数据帧传输到管理节点。

第二级网络由汇聚节点和管理节点组成（管理节点由汇聚节点连接服务器构成）。汇聚节点作为第二级网络的基本工作站，在联合站内的管理节点作为核心组成星形网络。管理节点同时用于存储所有数据，管理人员可以进行查询、监控和打印报表。通常第二级网络需采用大功率的无线数传模块作为网络通信设备。

可以利用已经建立的局域网构成第三级办公网络，数据库服务器分布在不同的联合站内，在局域网内的任何一台电脑上，通过管理软件可以对联合站的数据库进行访问，实现数据的共享。系统结构如图 1 所示。

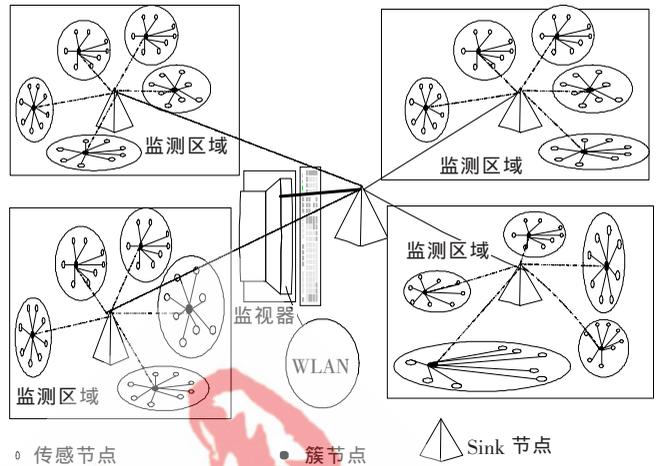


图 1 系统结构

2 硬件设计

2.1 传感节点设计

传感器网络节点是网络的基本单元，目前，不同应用中各种节点的组成结构不尽相同，导致通用性及可维护性降低^[6]。本文构建了一个类似于软件无线电的通用节点结构，将硬件功能软件化以解决上述问题^[7]。

微控制器模块是网络节点的计算中心，选择合适的微控制器在节点设计中至关重要。微控制器模块的设计主要考虑以下几个方面：（1）选择带 Flash 的 8 bit 或 16 bit 简单内核的微控制器，带 Flash 的微控制器可将功耗降低 5 倍；（2）低电压供电可以大大降低系统的工作电流，基于漏电流的考虑，选择 3 V（3.3 V）要比 5 V 供电的功耗至少降低 40%^[1]。综合考虑功耗、体积和功能等因素，本选择 ATmega8L 单片机作为控制器^[8]。

无线通信模块是网络节点的重要组成部分，需要满足低功耗、通信质量、通信距离、通信速度、组网方便、抗干扰和易于布控等要求。根据前面分析，Wireless USB 技术在无线传感器网络领域有独特优势，本文以基于该技术的 CYRF6936 芯片为核心设计射频电路部分，CYRF6936 是典型的低成本高集成度 2.4 GHz DSSS 射频片上系统，具有可配置的双向功能。数据传输速率可达 1 Mb/s，最大发射功率为 4 dBm，可工作在 $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 环境中，功耗低，待机电流仅 $1 \mu\text{A}$ ^[9]。

ATmega8L 的 PC0~PC5 端口作为传感器数据采集端口，通过 SPI 口连接 CYRF6936，SPI 口（SS、MOSI、MISO、SCK）同时作为程序下载端口。此外，ATmega8L 的 PD3（INT1）脚连接 CYRF6936 的 IRQ 脚，接收射频中断信号。射频部分元器件均采用 0402 封装。单片机 ATmega8L、射频芯片 CYRF6936、电源芯片 XC6209B332 的外围电路分别见其参考设计。在单板上完全集成节点的全部组成部分，结构紧凑，降低了使用功耗。电路布局时，将强电信号电路和弱电信号电路分开，数字信号电路和模拟信号电路分开，完成同一功能的电路尽量安排

网络与通信 Network and Communication

4.2 网络层协议的设计^[11]

时钟同步对任何分布式系统而言都是很重要的,无线传感器网络中许多算法或协议也需要节点间的时钟同步作为支撑。在无线传感器网络的应用中,传感器节点采集的数据如果没有空间和时间信息是无任何意义的。此外,准确的时间同步是实现传感器网络自身协议的运行、数据聚集、TDMA 调度、协同休眠、定位等的基础。本文将簇节点同时作为时钟同步节点,如 MAC 协议中所述,各传感节点每次与簇节点通信时都以其时钟为基准进行一次时钟校准,因为各节点都定期以此节点为时钟基准校正,可近似认为网络时钟是同步的(本文中所有节点使用的外部晶振时钟漂移率不超过 30 ppm)。

本文 MAC 协议中,簇节点采用轮询访问的方式与各节点通信,故所用网络拓补的方法是:新节点采用各传感节点未使用的合法 PN 码(簇节点可产生的 PN 码),当节点需要加入网络时,先发送申请加入网络的信息,接着进入侦听的状态,持续 1 s,随机延迟后再次发送申请信息,如此循环,直到簇节点轮询到该节点时接受其加入网络请求。然后,根据收到的允许加入网络的信息,节点修改自己的时钟,达到时间同步,这样新的节点就成功入网。轮询过程如图 6 所示。

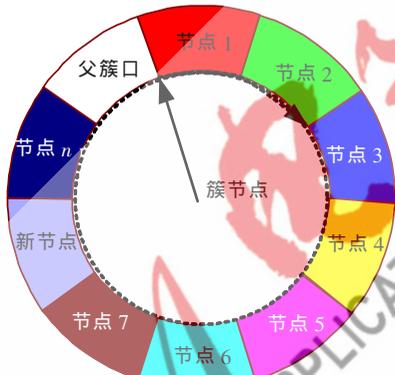


图6 轮询过程示意图

4.3 功率控制

传感器节点的耗能,除采用低功耗器件外,还应从节点的工作体制上考虑。除 MAC 协议中提到的睡眠机制外,本文采用功率控制算法进一步降低功耗。功率控制是指通过合理地设置或动态调整节点的发射功率,在保证整个网络连通的同时,降低对其他设备的干扰,达到提高节点能量利用率,延长网络生存时间的目的。文中各端节点根据接收到的时钟同步信号强度调整发射功率^[12]。

4.4 安全机制

赛普拉斯建议采用微型加密算法(TEA)作为 Wireless USB 的加密算法。微型加密算法是现有最快速、最高效的加密算法之一,它是一种采用混合(正交)代数组(这里为 XOR、ADD 和 SHIFT)运算的 Feistel 密码,每次用 128 位密钥加密 64 个数据比特,抗差动密码分析的能力极强,6 轮之后才能实现全漫射。需说明的是,任何加密

算法都可用于 Wireless USB,不只限于 TEA。

4.5 抗干扰机制

除协议中使用的扩频技术外,本文还采用以下技术增强网络抗干扰能力。

(1) 纠错编译码

Wireless USB 技术支持的数据传输帧结构简画如图 7 所示。



图7 系统帧格式

项目采用微控制器内集成的 ADC 采样转换电路,采样精度为 10 bit(各数据位由低到高权值从 $2^0 \sim 2^9$ 不等),而上述帧格式中每一路(实质是每一种传感器的值)采样数据占 2 B(16 bit)。为满足系统帧结构,且考虑低权值位发生错误影响较小的特点,文中采用双(7,4) BCH 编码(低 2 位不编码),即按权值分段编码,权值最高的 4 位作一组 BCH 编码,较低的 4 位作完全不相关的另一组 BCH 码,这样既能纠正不止一位错误,而且即使发生错纠,也是段内错误,减小错误程度。码字结构如图 8 所示。

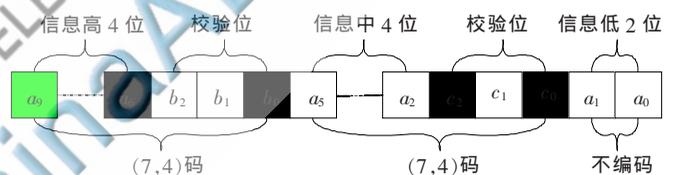


图8 双(7,4) BCH 码结构

(2) CRC 校验技术

系统附加 CRC16 于每一个数据包中。CRC16 是一个 16 bit 的循环冗余校验码(CRC),使用 USB 的 CRC 多项式运算所得,可以检测所有单位和双位差错。

(3) 数据应答与重发

为使传感器节点尽量将每一周期内的检测数据无误地发送到簇节点,本文使能 Wireless USB 的 ACK 功能。簇节点收到正确数据包后自动发送 ACK 信号。端节点发射数据前设定 ACK 等待时长,发送完数据后,打开超时定时器开始计时,同时转入接收模式。如果设定时间内未收到 ACK 信号,重发数据,否则,进入睡眠模式。

(4) 频率捷变

只是在受到干扰时频道才发生改变,如图 9 所示,如果当前频道受到了干扰,系统通过鉴别错误数据包的数量来判断信道的链接质量。如果错误包的数量超过了设计的极限,就跳转到下一频道;此外,还要周期性地侦听频道信号强度,如果一个强的信号持续一段时间,则跳转出去。

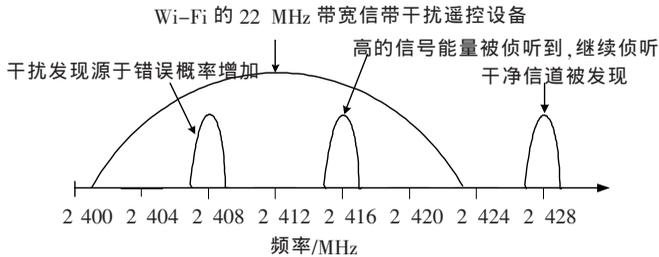


图9 频率捷变示意图

5 实验及结果分析

(1) 有效通信距离测试

CYRF6936 支持 SDR/DDR/8DR/GFSK 4 种工作模式,发射功率可控为 -35 、 -30 、 -24 、 -18 、 -13 、 -5 、 0 和 4 dBm 共 8 个档次;CC2591 最高发射增益 22 dB,最大发射功率 22 dBm,最高接收增益 11 dB。测试中选择 8DR 模式,该模式下,接收灵敏度为 -97 dBm, Sink 节点将发射功率和接收增益设置为最大值,射频频率设定在 2 400 MHz 频段,4 节 5 号电池供电,天线距离地面高度为 1.5 m。传感器节点之间有效通信距离,室内 10 m,户外 30 m。传感器节点与 Sink 节点有效通信距离测试如表 1 所示。

表 1 距离测试结果

发射功率/dBm	-30	-18	0	4
办公区	6	17	140	220
有效距离/m	8	31	250	390

(2) 共存性能测试

打开实验室所有设备及蓝牙、Wi-Fi、WLAN 等,测试表明系统可在复杂电磁环境下正常工作。

所开发的无线传感器网络,以 Wireless USB 技术为平台,依托认知无线电、软件无线点理念,充分利用频率捷变技术、数据应答与重发技术、CRC 校验技术、DSSS 技术、BCH 技术和 RSSI 功能,功耗低,抗干扰能力强,能在复杂电磁环境中正常工作。通过 AGC 调节发射功率实现不同距离可变功率控制。该设计性能优越,应用前

景广阔。但研究尚处于试验阶段,各种功能尚不完善,有待在以后的研究中深入开发。

参考文献

- [1] 景博,张劫,孙勇.智能网络传感器与无线传感器网络[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [2] Cypress Semiconductor. 2.4 GHz 频段上的新一代点对点无线技术[J].世界电子元器件,2004(1):28-30.
- [3] Cypress 的 Wireless USB 扩至多点到点(N:1)应用[J].电子产品世界,2005(1):122.
- [4] Cypress Semiconductor. 防止 2.4 GHz ISM 频带的干扰——从硬件与软件技术中建构坚固的 RF 通信环境[J].电子与电脑,2004(8):90-95.
- [5] Cypress Semiconductor. Cypress 供应 WirelessUSB LP 器件 [17][EB/OL]. <http://www.csyb.com.cn/it/p286/J28635231.html>, 2013-06-01.
- [6] 唐旻,赵曙光,方艳红.基于无线 USB 技术的系统开发与应用[J].单片机与嵌入式系统应用,2005(11):48-51.
- [7] 向新,张启发,王兴华,等.软件无线电原理与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [8] 马潮.AVR 单片机嵌入式系统原理与应用实践 [M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [9] Cypress Semiconductor. Optimum PCB and stencil layout for wireless USB QFN package[Z]. 2005.
- [10] 侯赛因·阿尔斯.认知无线电、软件定义无线电和自适应无线系统[M].任品毅,等,译.西安:西安交通大学出版社,2010.
- [11] 于宏毅,李鸥,张效义,等.无线传感器网络理论、技术与实现[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [12] 杜晓通.无线传感器网络技术与工程应用[M].北京:机械工业出版社,2010.

(收稿日期:2013-06-08)

作者简介:

宋晓鸥,女,1984年生,博士,讲师,主要研究方向:超宽带通信、通信信号处理、认知无线电和 Wireless UWB 等。