低功耗无线传感器网络终端节点设计

杨 琦,陈辉煌,石江宏*
(厦门大学信息科学与技术学院,福建 厦门 361005)

摘要:针对无线传感器网络(WSN)节点的能量有限的缺点,利用超低功耗 MCU 作为主控器件,采用工作模式和睡眠模式交替工作的软件协议,设计出低功耗的 WSN 终端节点.组网测试表明,该网络能正确组网,在 3 V 电源供电条件下,样机正常工作时发送电流小于 15 mA,接收电流小于 7 mA,休眠时电流小于 65 μA,实现低功耗设计目的.

关键词:传感器网络;低功耗;无线收发;协议
中图分类号:TN 915 **文献标识码**:A **文章编号**:0438-0479(2008)03-0357-04

无线传感器网络(WSN)具有快速部署、自组织能力、容错抗毁等特性,可广泛应用于战场防御和侦查、安全监视、环境监控、医疗诊断等领域.但由于传感器节点体积微小,分布地域广,通常采用电池供电.为高效使用能量来最大化网络生命周期,要求 WSN 终端节点的设计具有低功耗、低成本、寿命长等特点.近年来,很多研究机构都根据特定的应用领域设计了各自的传感器节点,如麻省理工学院的 uAMPS[1],UC Berkeley 的 MICA[2]、Telos[3]等节点,都主要通过低能耗器件和规划节点的工作负载周期来降低节点的整体功耗.本文针对低功耗要求,利用超低功耗 MCU 作为主控器件,采用工作模式和睡眠模式交替工作的软件协议,设计出低功耗的 WSN 端节点.其硬件结构如图 1 所示.

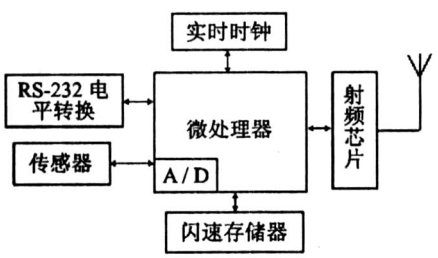

图 1 传感器节点硬件结构
Fig. 1 Hardware structure of sensor network node

无线传感器终端节点的体系结构由传感器模块、处理模块、无线收发模块和能量模块组成[4].传感器模块负责监控区域内信息的采集和数据转换;本系统以超低功耗处理器 MSP430F149 为处理模块控制整个传感器节点的操作,外扩一片 Flash 存储器 AT45DB321 存储本地采集的数据以及其他节点发来的数据;以无线收发芯片 nRF401 为无线通信模块,与其他传感器节点进行通信传输采集的数据;采用微型电池作为能量供给模块.

1 硬件电路实现

1.1 处理器

处理器模块是无线传感器节点的计算核心,所有的设备控制、任务调度、通信协议和数据存储程序都在这个模块的支持下完成,所以处理器的选择在 WSN 节点设计中至关重要.MSP430F149 系列是美国德州仪器公司生产的一种超低功耗的 Flash 微控制器,其存储器模块内部集成 Flash 存储器,消耗功率仅为其它闪速微控制器(Flash MCU)的 1/5,由于有 ESD 保护功能,抗干扰力特强,适合于作为传感器节点的主控器件.

MSP430F149 处理器内含 Flash ROM 多达 60 kbit,可存放系统运行的程序.片内 RAM 多达 2 kbit,可存放一些配置数据.由于无线传感器节点通信传输能力有限,很多数据不可能实时转发出去,为增加本地数据存储容量,必须外扩一片存储器存储所采集的数据.所选用的闪存 AT45DB321 是 3 V 电压供电、存储容量为 4 Mbit 的串行 Flash 存储器,器件工作电流仅为 4 mA,待机电流小于 3 μA.它采用 SPI 串行总线存储数据,仅 3 根线就可完成对存储器的读写.由于 MSP430F149 有两个通用的串行口,可工作在 UART 和 SPI 两种方式,我们利用 MSP430F149 的一个串行口,实现对 AT49DB321 的读、写操作,硬件接口电路如图 2 所示.

为了能对传感器节点所采集的数据进行与时间相

收稿日期:2007-11-02
基金项目:福建省自然科学基金(A0710021),福建省重大专项基金(2007H20003)资助
*通讯作者:shijh@xmu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

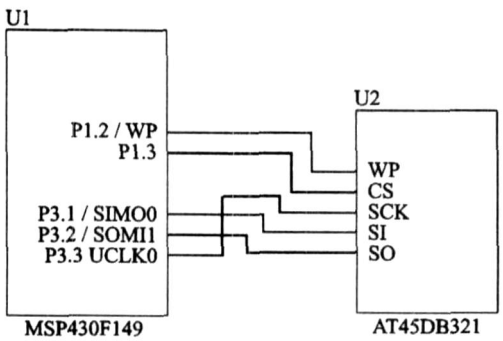

图 2 数据存储器接口电路

Fig. 2 Interface circuit of data memory

关的分析,需要将采集的数据附上采集时间,因此在每个终端节点都加入一个实时时钟芯片 X1203. X1203 内部的双端口时钟和报警寄存器可使时钟即使在读写操作期间也能精确地工作,供电电压在 2.5～6 V 之间均可工作,工作电流小于 1 μA. 我们通过 MCU 的 I/O 口来模拟 I^2C 总线接口的时序,实现 MSP430F149 与 X1203 的接口问题. 系统采用汇聚节点发送时标信息来实现各个节点的时钟同步.

1.2 无线通信电路

无线通信电路是 WSN 节点的重要组成部分. 射频芯片选用 Nordic 公司的单片无线收发芯片 nRF401,工作在 433～434 MHz 的 ISM 频段,采用 FSK 调制解调技术,抗干扰能力强;空中最高数据传输速率为 20 kbit/s,发射功率可调,最大为 10 mW;工作电压范围为 2.7～5.25 V. 接收灵敏度小于 $3.16 \times e^{-11}$. 在 0.1 mW 输出时,发射电流为 8 mA;接收电流为 250 μA;待机电流为 8 μA. nRF401 可以通过串行口与单片机直接连接,无需复杂编码,所需外围元件很少,还具有待机模式,更加省电和高效,适合嵌入式设备,电路原理图如图 3 所示.

nRF401 芯片的 CS 引脚可用来选择频道,TXEN 作为发射/接收控制引脚用来控制芯片的发送/接收模式;节能控制引脚 PWR 用来控制使芯片处于工作模式或者待机模式,为了节省功耗,在节点处于休眠状态时使射频芯片处于待机模式;DIN 和 DOUT 引脚作为数据输入和数据输出引脚,分别接 MSP430F149 处理器的另一个串行口,使其工作在 UART 模式下实现对数据的传输.

1.3 主机通信接口

一般传感节点将所采集的数据传送给汇聚节点后,汇聚节点通过 RS232 接口将数据传输给计算机,因此汇聚节点需要有主机接口. 计算机进行串行通信的高电平为 - 3～ - 15 V,低电平为 3～15 V,而从 MSP430F149 单片机输出信号的高电平为 3 V,低电平 0 V,要实现 MSP430F149 单片机与计算机通信必须进行电平转换. 这里我们采用了 MAXIM 公司生产的收发两用接口 MAX3227,它可以进行 TTL 电平与标准 RS-232 电平之间的转换,电源电压范围很宽,从 1.8 V 到 4.25 V,且具有自动关断功能,即在没有接收到有效的 RS-232 信号时它将处于休眠状态,此时的耗电量仅 1 μA,它的数据传输速率为 1 Mbit/s,电平转换电路如图 4 所示.

由于 MSP430F149 只有两个串行口,考虑到汇聚节点始终与主机通信,不需要片外存储器,所以让 MAX3227 和 AD45DB321 共用一个串行口. 通过跳线选择,当作为普通设备节点时连接至片外存储器;当作为汇聚节点时,连接至 MAX322. 通信建立连接时,若 MAX3227 检测到 RS-232 电平有效,则$\overline{\text{INVALD}}$端输

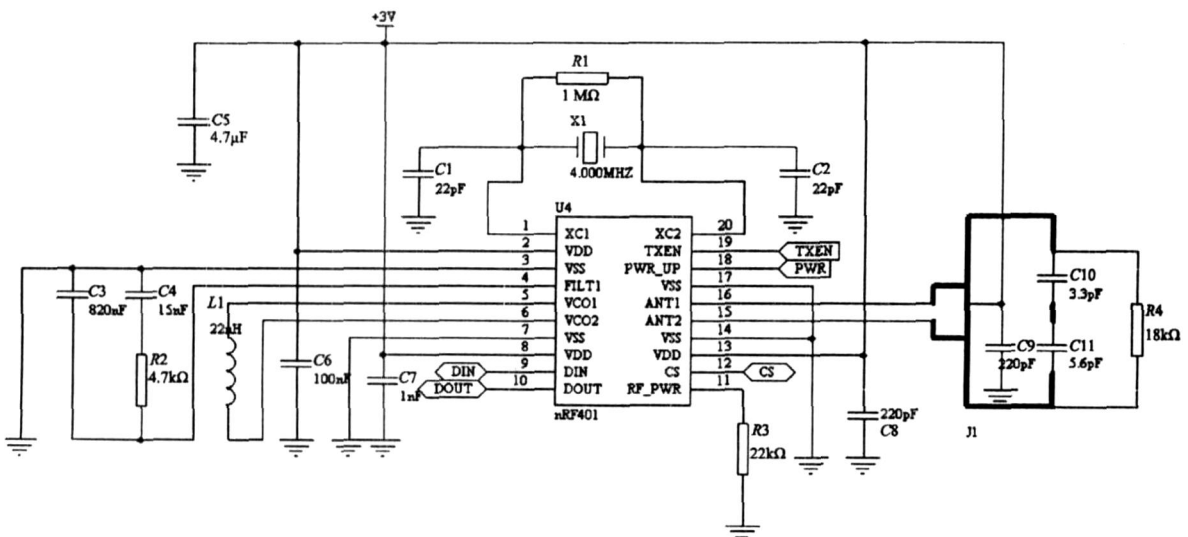

图 3 射频接口电路

Fig. 3 RF interface circuit

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

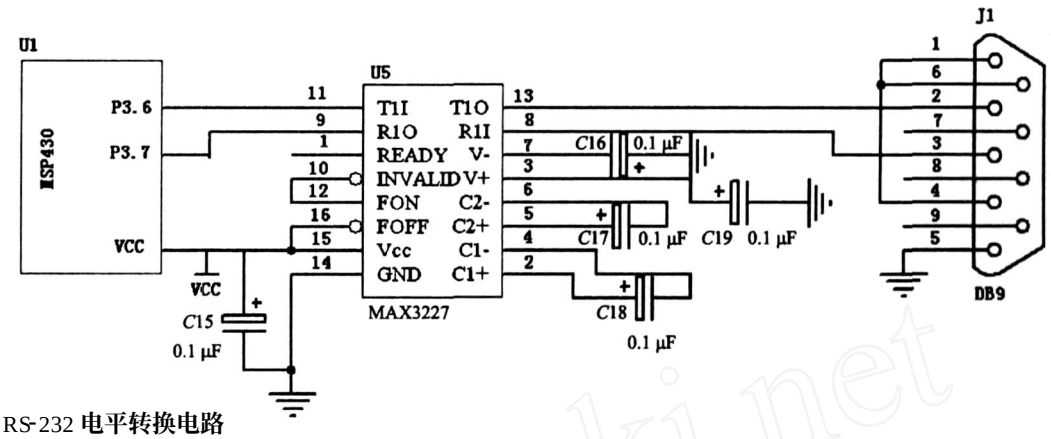

图 4　RS-232 电平转换电路

Fig. 4　Level shift circuit of RS-232

出高电平,使芯片强制上电工作;若通信未建立连接,INVALD端输出低电平,芯片处于休眠状态,从而达到省电的目的.

2　软件协议设计

WSN 的软件由通信协议和具体应用软件组成. 通信协议包括物理层、数据链路层和路由层软件,目前各层次还没有标准化[5]. 事实上,WSN 与应用的联系非常紧密,一般是针对各种应用定义一组可行的通信协议. 本系统采用 CSMA/CA 方法[6]接入信道,采用树状组网方式. 为了保证软件可靠性并简化软件开发,本系统采用单片机程序完成,一个软件程序可以同时运行于汇聚节点和一般传感器节点.

传感器节点在开机后首先进行硬件自检,如果自检失败,进行硬件故障提示并自动关机. 如果自检通过,再进行工作模式判断,使之工作于汇聚节点工作模式或工作于一般节点工作模式. 主程序流程如图 5 所示.

一般节点在自检通过后申请接入网络,接入成功后转入正常业务状态,完成数据采集与传输、中继转发、新节点入网确认等操作. 在业务工作时,WSN 各个节点通过 MSP430F149 单片机片内的定时器触发实时采集数据. 节点周期性的将采集到的数据发送给汇聚节点. 通信过程采用 CSMA/CA 协议. 考虑到节点采用电池供电,为了节省能耗,使之工作在活动状态和休眠状态下交互轮换. 当节点由于其他原因被迫与网络断开连接时,需要重新寻找父节点加入网络.

为了实现低功耗运行,普通设备节点在业务状态和休眠状态之间轮换工作. 普通设备节点活动时间到时进入休眠状态,MCU 进入低功耗工作状态,关闭射频收发器以便节省功耗,直到定时时间到后再转入活动状态.

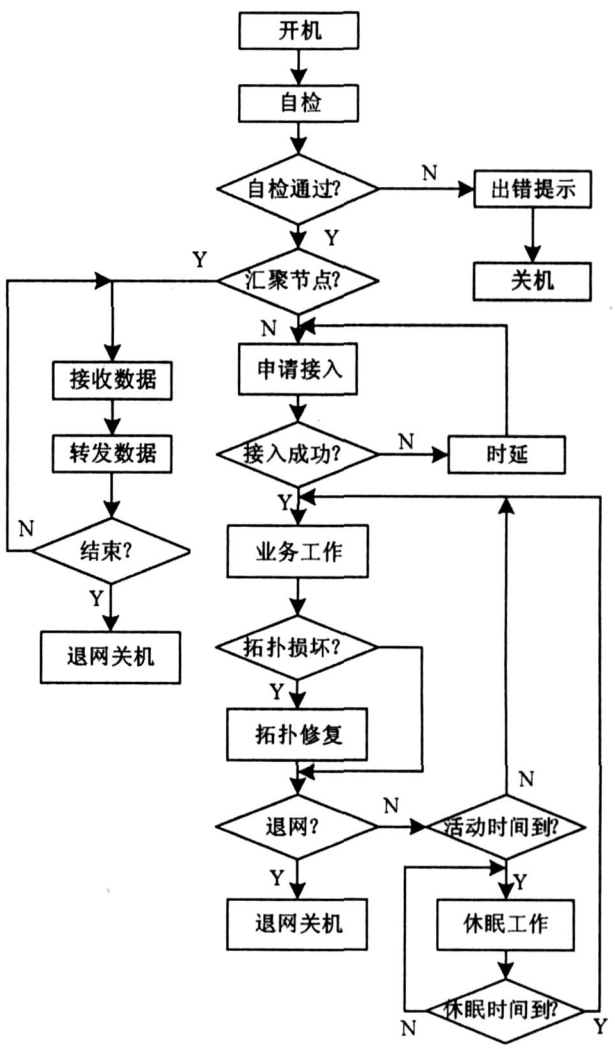

图 5　主程序流程图

Fig. 5　Flow chart of main program

汇聚节点是网络的控制中心和数据汇聚中心,始终处于活动状态,以处理所接收的数据,检测网络状态,并保持与主机通信. 直接连接计算机,一般来说有

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

源供电,故不进行休眠,始终处于活动状态,以接收检测命令和下级节点的检测数据.

3 实验结果

设计的节点样机中,选用 1 个作为汇聚节点,19 个普通设备节点,进行组网实验. 网络中的各个节点把数据传输到汇聚节点,汇聚节点通过串行口把数据传送到个人计算机. 运行于个人计算机上面的后台系统对接收到的数据进行处理分析,对节点进行参数设置,并实现拓扑显示,实验结果如图 6 所示. 实验结果表明节点工作正常,从后来系统看出,网络能自动形成拓扑结构,实现自动组网.

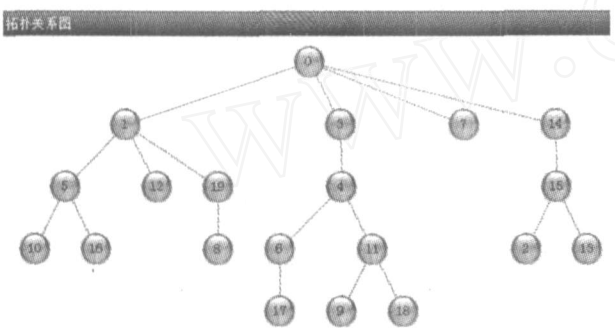

图 6 WSN 实验结果

Fig. 6 Experiment result of sensor network

样机测试结果表明,普通设备节点在开阔地单跳最大传输距离大于 100 m. 点对点通信最高数据传输速率为 20 kbit/ s,误码率小于 10^{-3}.

在 3 V 电源供电条件下,不计传感器功耗,样机正常工作时发送电流小于 15 mA,接收电流小于 7 mA,休眠时电流小于 65 μA,低于同类产品[7],实现低功耗设计目标.

4 结 论

设计了低功耗的 WSN 的软、硬件系统,并实现样机组网测试. 结果表明,通过硬件器件选择、电路设计及协议软件优化设计,能有效达到节能目的. 组网测试表明,样机整体功耗较小,系统能实现正确组网,符合设计目标. 下一步工作的主要目标是着力于解决在网络若干节点局部干扰的情况下实现数据正常通信的路由问题.

参考文献:

[1] Shih Eugene, Cho Seong Hwan, Ickes Nathan, et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks[C]//The 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. USA: ACM, 2001: 272 - 286.

[2] Hill Jason L, Culler David E. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks[J]. IEEE Micro, 2002, 22(6): 12 - 22.

[3] Polastre Joseph, Szewczyk Robert, Culler David. Telos: enabling ultra-low power wireless research [C]//2005 Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. 2005: 364 - 367.

[4] Akyildiz I F, Su Weilian, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communication Magazine, 2002, 40(8): 102 - 114.

[5] Holger Karl, Andreas Willig. 无线传感器网络协议与体系结构[M]. 邱天爽, 唐洪, 李婷, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007.

[6] IEEE 802.11. Wireless LAN Medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]. USA: IEEE, 1999.

[7] 艾春丽, 张凤登, 刘荣鹏. 无线传感网能量监测方法研究[J]. 自动化仪表, 2007, 28(12): 5 - 7, 11.

Low Power Design of the Terminal Node for Wireless Sensor Network

YANG Qi, CHEN Hui-huang, SHI Jiang-hong *

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A prototype of wireless sensor network terminal is designed based on the energy finitude characteristic. The hardware system consists of MSP430F149 ultra low power MCU and other correlative energy efficiency devices. Furthermore, the protocol adopts the sleep mode and awakening mode to alterative working for saving energy. At the end, network-building experiment performed shows that, with the 3 V power supply, the current of transmitting mode, receiving mode and sleep mode is less than 15 mA, 7 mA, 65 μA respectively.

Key words: sensor network; low power consumption; wireless transceiver; protocol

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net