

文章编号:1001-9081(2006)02-0303-04

一种 IPv6 无线传感器网络节点的设计与实现

霍宏伟,张宏科,郜 帅,牛延超

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

(xiaosongshu2000@sohu.com)

摘 要:通过总结无线传感器网络硬件节点的设计原则,提出了一种无线传感器网络通用节点设备的基本构架,设计实现了基于超低功耗处理器 Atmega128 和射频芯片 CC2420 的无线传感器网络节点设备。该设备具有能量自检测功能,并可以改变通用硬件接口上的数据采集部分实现多种不同类型的应用。采用模块化软件设计,引入有限状态机进行系统模式调度,设计实现了既能独立运行又支持嵌入式操作系统的节点适应层软件。通过引入多个节点的温度采集与反馈控制实验和节点生命周期静态测试实验验证了本设计的可行性和实用性。

关键词:通信网络技术;无线传感器网络;节点设计;

中图分类号: TP393.02 **文献标识码:** A

Design and implementation of IPv6 wireless sensor network node

HUO Hong-wei, ZHANG Hong-ke, GAO Shuai, NIU Yan-chao

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A fundamental structure of the universal wireless sensor network node device was proposed in this paper by summarizing the principle of the wireless sensor network node. And a wireless sensor network node device was implemented based on the ultralow power consumption processor Atmega128 and the radio frequency chip CC2420. This node device could do power monitoring itself. It also could be used in many condition by exchange the data collection circuit which was connected to the universal hardware interface. Software modularization design was used in this paper and finite state machine was used to finish the system mode scheduling. An adapt-layer software was designed and implemented, which could both run by itself and by the embedded operating system. The technical feasibility of this design and the availability of the device were also verified in this paper by the multi-node temperature collect and feedback control tests and the static life cycle test of this device.

Key words: communication network technology; wireless sensor network; node design;

0 引言

无线传感器网络是由监视区内大量低成本微型传感器节点构成的无线自组织系统。无线传感器网络^[1]以微型传感器为中心,集成数据采集、数据处理、通信、控制等多种功能,可以完成信息世界与物理世界的沟通,将彻底改变人与自然的交互方式。无线传感器网络节点通常被认为是一种微型嵌入式系统设备。它集成了网络终端和路由器的功能,可以完成数据的采集、处理、聚合、存储、转发等功能,也可以与其他节点协调完成一些特定任务。

近年来,美国国防部、能源部和 Intel 公司等国外机构建设了很多演示系统。比较接近实用的传感器节点硬件设备主要包括 Smart dust 和 Mote 系列。设计实现一种满足低成本、低功耗等要求的 IPv6 无线传感器网络节点设备,是传感器网络研究的热点之一。

本文提出了一种无线传感器网络通用节点设备的基本构架,设计实现了一种具有实用价值通用节点软硬件平台,并通过引入多个节点的温度采集与反馈控制实验和节点生命周期

静态测试实验验证了本设计的可行性和实用性。

1 设计原则与系统构架

无线传感器网络与应用密切相关,基于不同的应用,节点软硬件平台都有很大差异。根据传感器网络的特点和应用需要,传感器节点通常分为通用节点和网关节点。对于通用节点的设计^{[1],[3],[10]}主要依据以下几个方面进行:

1) 节能。节能是传感器网络节点设计最主要的问题。无线传感器网络要部署在人们无法接近的场所,而且不常更换供电设备,对节点功耗要求就非常严格。在设计过程中,应采用合理的能量监测与控制机制,功耗要限制在几十毫瓦甚至更低数量级。

2) 低成本。成本的高低是衡量传感器网络节点设计好坏的重要指标。传感器网络节点通常大量散布,只有低成本才能保证节点广泛使用。这就要求无线传感器节点的各个模块的设计不能特别复杂,否则不利于降低成本。

3) 微型化。微型化是传感器网络追求的终极目标。只有节点本身足够小,才能保证不影响目标系统环境;另外在战

收稿日期:2005-08-24;修订日期:2005-10-25

作者简介:霍宏伟(1982-),男(蒙古族),内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要研究方向:IP 路由技术、无线传感器网络;张宏科(1957-),男,山西大同人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机网络技术、IP 路由技术、无线传感器网络、网络安全技术等;郜帅(1980-),男,河南济源人,讲师,主要研究方向:IP 路由技术、无线传感器网络;牛延超(1981-),男,山东文登人,博士研究生,主要研究方向:无线传感器网络。

争侦查等特定用途的环境下,微型化更是首先考虑的问题之一。

4) 可扩展。可扩展性也是传感器节点设计中必须考虑的问题。传感器节点应当在具备通用处理器和通信模块的基础上拥有完整、规范的外部接口,以适应不同的组件。

另外,在缺乏物理安全保证的条件下保证数据的准确和传输的安全以及节点电路在恶劣的条件下工作的稳定性等方面也是应当考虑的问题。

基于上述原则,一个无线传感器网络通用节点的硬件体系结构应尽量简单且适用。本文提出一种实用性强的新型节点构架。该硬件构架包括数据采集模块、系统核心模块和通用接口。软件构架包括适配层软件和上层软件。通用节点构架见图1。

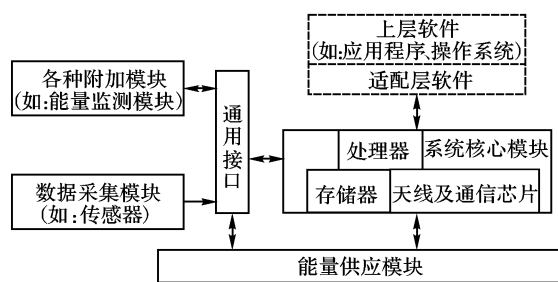


图1 改进的通用节点构架图

这种构架的优点包括:选用低功耗的微型处理器芯片和射频通信芯片构成系统核心模块,实现系统作为微型计算机系统的基本功能,在结构上减小系统的复杂性、降低系统功耗;通过通用接口实现附加功能与系统核心驱动模块相分离,用户可以根据实际应用添加不同的数据采集传感器和控制器,还可以添加定位系统、续电模块等各种附加模块,从而使节点具备很强的可扩展性;可以利用通用接口添加能量监测模块以便进一步控制系统功耗;改变传统的操作系统、协议栈、应用程序相结合的软件体系结构,设置适配层软件完成最基本的硬件功能,将操作系统等复杂软件结构纳入到上层软件中作为可选配置,降低了系统复杂性。

2 系统实现

本文使用 ATMEL 公司推出的 Atmega128 处理器和 Chipcon 公司的 CC2420 分别完成了传感器通用节点设备和网关节点的设计。限于篇幅,本文将主要详细介绍通用节点的设计。

2.1 节点硬件结构

1) 总体结构

节点由以 AVR 高端处理器为核心的硬件平台和专门设计的智能适配层软件相结合而成。适用于底层协议基于 2.4GHz 无线个域网通信的传感器网络以及其他类型网络。硬件部分主要包括传感器、通用接口、微处理器、无线电路和电池、能量监测电路组成。

本文选用 ATMEGA128L-64I 作为处理器芯片。Atmega128^[8] 是基于 AVR RISC 结构的低功耗 CMOS 8 位 AVR。通信电路采用 CC2420,使用单极天线(有效覆盖范围 70m~100m)。采用 9V 电池供电。为适应多种应用,设计了通用接口,通用接口中有适配电路,以适应不同电参数部件直

接接入系统。通常节点的输出控制器即通过该接口接入。数据采集模块也利用通用接口与 MCU 相连接,因此可以根据多种不同应用随时更换为各类型的模拟传感部件(本文以 LM6x 系列温度传感器为例进行介绍)。为节约能源,输出控制器、数据采集电路和电源控制模块等用模拟信号输入的部件采用总线式接入方式与 MCU 进行信号传输。根据各个电路特点、设定不同的时钟周期,在自己的时钟周期到来时,方能与 MCU 进行通信,其余时间不工作以便节约能量。其硬件系统结构见图2。

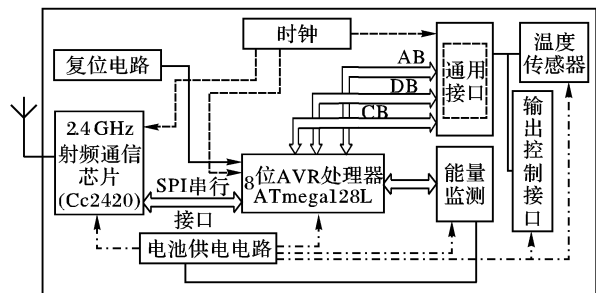


图2 节点硬件系统结构

2) 射频通信模块

Chincon 公司推出的 CC2420^[9] 是基于 IEEE802.15.4 协议的射频收发芯片,工作频段范围为 2.400 到 2.4835GHz,数据速率达 250kbps,码片速率达 2MChip/s;采用 O-QPSK 调制方式;超低电流消耗,接收灵敏度可以达到 -94dBm;抗邻频道干扰能力强。在 MCU 与射频单元的通信中采用并行总线制通信方式。射频单元通过 4 线 SPI 总线控制芯片工作模式实现读写缓存数据。CSn 作为 CC2420 的片选信号、SCLK 为 MCU 与 CC2420 之间提供时间同步。MCU 通过对 FIFO 和 FIFO 进行收发缓存器设置,此外通过 CCA 做通道清除、SFD 控制时钟与定时信息。利用 CC2420 内部的 33 个 16bit 寄存器进行状态设置,在寄存器读写周期内,SI 总线上共有 24bit 数据,包括存储选择 1bit、读写控制 1bit、地址选择 6bit、和数据;采用 MSB 优先方式传输。MCU 与 CC2420 通信接口如表 1 所示。

表1 MCU 与射频单元通信管脚使用列表

CC2420 使用管脚	ATMEGA128 对应管脚
SCLK	SCLKn
SI	MISO
SO	MOSI
FIFO	GIO0
FIFO	INET
CCA	GIO1
SFD	TCA

3) 能量监测

以电池供电的传感器节点,应及时了解自身能量存储与消耗情况并根据自身能量状态来调整节点某个部分的工作状态和节点间的通信策略。文献[3]说明了基于 Mica2 的电源电压监测方法,并在实际中证明其简单有效,但依赖于稳压电路的参数,不够灵活。文献[10]提出了一种精确的适时传感器节点能量消耗测量与分析方法,但需要构建专用的测试平台。本文综合二者的优点,利用 ATMEGA128 的 ADC 差分通道,构建了能量监测模块。其基本原理是,首先确定传感器工

作的电压档位,以便在不同能量供应状态下应采取不同的策略。如 V_{d1} 、 V_{d2} ……本设计采用三档位设计,在实际电路中,可以通过选择三个不同参数稳压二极管得到。将来自于电源正极的电平值作为参考电压值 V_{ref} 输入 MCU 差分控制通道,并分别同来自其他通道的 V_{d1} 、 V_{d2} 、 V_{d3} 进行比较。利用式(1)便可以计算出 ADC 的读数 D_{ADC} ,从而掌握电源电压的变化。

$$\frac{D_{ADC}}{V_{di}} = \frac{ADC_{FS_i}}{V_{ref}} \quad (1)$$

其中: ADC_{FS_i} 是输入满量程时的测量值。 V_{di} 取值作如下规定: $V_{ref} > V_{d1}$ 时,取 V_{d1} ; $V_{d1} > V_{ref} > V_{d2}$ 时,取 V_{d2} ; $V_{d2} > V_{ref} > V_{d3}$ 时,取 V_{d3} 。

4) 数据采集

节点的数据采集部分可根据实际需要选定合适的传感器,如振动、声响、温度、光等,本设计选用 National Semiconductor 公司的 LM60 温度传感器。LM60 作为传感器接入系统的数据采集电路,原理见图 5。LM60 是一种新型温度传感器,仅占用一根 I/O 数据线传输数据。其测量范围为 $-25^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$,在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 之间精度为 $\pm 0.6^{\circ}\text{C} \sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。其电压输出随温度变化而变化。具体计算见式(2):

$$V_0 = (+10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \times T^{\circ}\text{C}) + 600 \text{ mV} \quad (2)$$

本设计中,采用 ADC 差分输入和单端输入并举模式进行。当要求精度较高时,使用差分模式;但需要改变软件设置并调节电位器 RT1,通常使用单端输入模式。模拟信号进入 MCU 后,通过逐次比较方式转换成 10 位数字量,经过与基准电压比较运算,并经过偏移补偿处理得到测量值。

2.2 软件设计

传感器节点的软件是传感器网络进行有效工作的灵魂。本设计采用适应层软件实现系统工作。适应层软件功能子程序采用汇编语言完成,可以对 MCU 的寄存器进行操作;主程序和调用功能子程序硬件抽象层采用 C 语言完成。适应层软件按功能包括主调度函数、初始化模块、系统状态管理模块和上层接口。

主调度函数负责协调各模块工作、进行中断处理、调度其他模块运行。初始化函数完成 MCU、CC2420 和相关组件的初始化。上层接口负责为协议栈和其他应用程序提供底层调度接口,通过上层接口状态标识产生软件中断。当节点必须配置操作系统时,整个适应层可以通过该接口成为操作系统的硬件适配层,主调度函数放弃系统管理权限,并移交给操作系统内核调度机。

系统状态管理模块依据 MUC 的工作状态将系统分为闲置模式、工作模式、唤醒模式、省电模式和空闲模式五种状态,状态管理模块依据模式寄存器采取有限状态机(FSM)的方式进行调度管理。系统状态管理模块中的闲置模式、工作模式为系统工作状态的模式;省电模式和空闲模式为 MCU 执行了 SLEEP 指令后,执行的六种休眠模式的两种,通过设置 MCUCR 寄存器完成。唤醒模式为瞬过模式,负责部分省电模式和空闲模式转换时对寄存器的设置和中断模式的调整。系统状态管理模块依靠自身的模式转换计时器维护其他模式间的转换。闲置模式指工作模式结束后系统未执行任何应用层指令,经过 30 s 后转入空闲模式;系统收发数据、采集信息、执行上层指令时为工作模式。空闲模式经 180 s 进入省电模

式。二者的区别是:省电模式除关闭 MCU 的绝大部分功能外,还关闭外部时钟源。因此,省电模式被唤醒时,需要更长的时钟周期来启动已经停止的时钟。系统状态管理模块有限状态机调度见图 3。

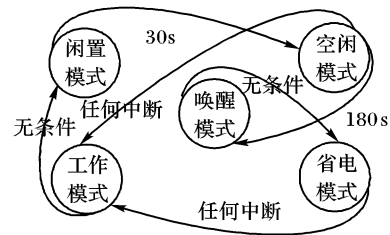


图 3 系统状态管理模块有限状态机调度

现以主调度函数为例对系统软件工作流程进行说明。硬件系统加电后,执行主调度函数,主调度函数首先复位所有组件,启动系统状态检测函数 SS_CHECK() 并调入初始化模块对 MCU、外围设备等进行初始化。初始化模块返回初始化标识并检验后,调入上层接口状态函数,上层接口状态标识决定是否交出调度权限给上层。若需交给上层,则设置中断向量、开启系统中断,调用声明函数引导操作系统并等待中断;否则在设置中断向量、开启系统中断后,立即调入系统状态管理函数,并等待中断,由系统状态管理函数依据有限状态机对系统进行调度,管理各种硬件中断。此后,主调度函数依据上层接口、系统状态管理模块产生的中断,调用中断服务程序使系统运行。中断服务程流程见图 4。

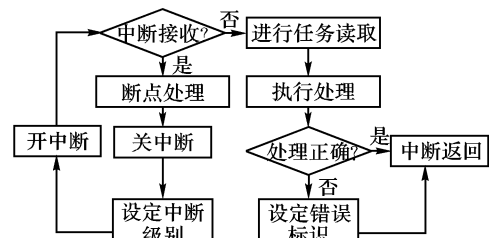


图 4 中断服务流程

初始化过程部分代码如下:

```
MAC_LAY_INIT(); // 设置 MAC 层框架
MODE_INIT(1); // 设置模式类型
PERIPHERAL_PORT_INIT(); // 外围通用接口初始化
ADC_INIT_P(); // 数据采集接口初始化
comSetRequest( COMM_ON); // 通信端口初始化
ENE_MONI(); // 启动能量监控
OUT_CTL(); // 设置输出控制框架
while ( TRUE) {
    if ( MODE) // 检验初始化结果
    { mainsign = TRUE; // 设置成功标志
      localAddress = 0x003fff; // 读取控制寄存器地址
      ...
    }
    SCH_INIT( mainsign, localAddress)
}
```

3 基于温度采集与反馈控制的实验与分析

为验证所实现的节点的可用性,本文构建了由 20 个节点组成的小型实验网、在面积为 30m^2 的室内环境中进行了温度采集与反馈控制实验和节点生命周期静态测试。

节点采用 IPv6 嵌入式协议栈。整个网络使用 IEEE 802.15.4 作为 MAC 层协议,网络层全面支持 IPv6,并使用自行开发的基于能量和链路状态算法的 IP 路由协议。实验拓扑采用星型、树型混合结构,忽略定位及同步问题。20 个节点中,有一块为网关节点并兼任网络协调者;另外一块节点,在节点上加载控制模块,与空调温控电路相接。其余 18 块节点以位置为中心分为 4 组、分别以十六进制数 0x1817 到 0x181A 作为每组标识,负责监测周围温度变化。各组内节点测得的温度在全功能节点上通过简单算术平均进行聚合,并回传给网关节点。图 5 指示了整个实验的拓扑环境。

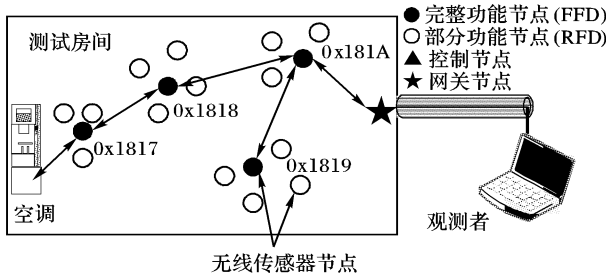
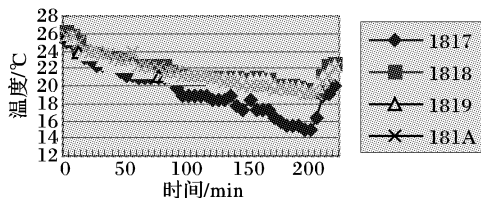
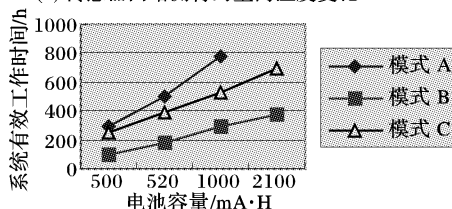


图 5 温度采集与反馈控制实验及拓扑环境示意图

温度采集与反馈控制实验基本过程如下:人工布置好节点后,启动空调,利用网关节点通过以太网连接 PC 机收集处理数据。每个节点均采集温度数据,并传送给全功能节点。PC 机设定一个温度阈值,当全部节点平均温度低于这个阈值(实验设定为 18°C)时,PC 机向网关节点发出关闭空调任务。实验数据曲线见图 6(a)。其中横轴为监测时间,纵轴为瞬时温度。容易看出,在系统运行 3 小时后接近阈设定值,空调节点被关闭前后,传感器节点测得的室温变化符合客观实际情况。



(a) 传感器网络测得的室内温度变化



(b) 电池容量与系统工作时间关系

图 6 实验数据曲线

节点生命周期静态测试过程是:将 20 个节点分别采用 4 种不同容量的 9V 电池供电,设定不同工作模式。其中模式 A 设置为每千分之一秒发送一次定长(1024 比特,1 个最长包)数据;模式 B 为全工作状态;模式 C 为每四千分之一秒发送一次定长(1024 比特,1 个最长包)数据。经过长时间测量,当电池电压降到初始设定的某个阈值(4.5V)以下时,定义电池生命周期结束。将测量结果按电池类型进行平均。实验数据曲线见图 6(b),其中横坐标为电池容量,纵坐标为系统有效工作时间。由此,节点即使在全工作状态下,采用容量为 500mA·h 的低成本电池,其有效工作周期仍然可以达到 120

个小时以上,可见本文设计的节点具有实用价值。

4 结语

随着处理器处理能力的增强和硬件成本的下降,传感器节点传输更丰富的数据已经成为可能。传感器网络作为互联网的延伸,必将被纳入下一代互联网的整体体系之中。对于传感器网络最重要的基础设施传感器节点设备的研究,也将进入新的纪元。

本文首先总结了传感器网络硬件节点的设计原则,提出了一种无线传感器网络通用节点设备的基本构架,依据该构架设计的传感器节点具备功耗低、成本低、微型化、可扩展性强等优点。在此基础上,设计实现了基于超低功耗处理器 Atmega128、射频芯片 CC2420 和温度传感器 LM60 的一种具有实用价值的低功耗通用节点硬件平台。重点分析了其数据采集和射频通信的实现,并对传感器节电能量检测模块进行了改进设计。软件设计采用模块化思想,引入了有限状态机进行系统模式调度,设计实现了既能独立运行又支持嵌入式操作系统的节点适应层软件。文中还简单介绍了与之配合使用的网关设备的设计方案。最后通过引入多个节点的温度采集与反馈控制实验和节点生命周期静态测试实验证明本设计简单、可行,符合传感器网络节点设备的特点,具有很强的科研价值和实用价值。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ IF, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* A Survey on Sensor Network[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102 - 11.
- [2] ESTRIN D. Tutorial "Wireless Sensor Network"[R]. <http://nesl.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02/>, 2005.
- [3] 孙立民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] <http://www.tinyos.net/scoop/special/hardware/#telosplatform>, 2003.
- [5] DUNKELS A, GRONVALL B, VOIGT T. Contiki — a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors Local Computer Networks[A]. Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04) [C]. 2004. 455 - 462.
- [6] CORPA. Atmega128 Data Book [EB/OL]. <http://www.atmel.com/dyn/products/datasheets.asp/>, 2004.
- [7] Chipcon AS SmartRF. CC2420 Preliminary Datasheet (rev 1.2) [EB/OL]. <http://www.chipcon.com/>, 2004.
- [8] MILENKOVIC A, MILENKOVIC M, JOVANOVIĆ E, *et al.* An environment for runtime power monitoring of wireless sensor network platforms System Theory [A]. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium [C]. 2005. 406 - 410.
- [9] KAWAHARA Y, KAWANISHI N, MORIKAWA H, *et al.* Top-down approach toward building ubiquitous sensor network applications [A]. Software Engineering Conference [C]. 2004. 695 - 702.
- [10] HILL JL. System Architecture for Wireless Sensor Networks A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements [D]. for the degree of Doctor of Philosophy in Computer Science in the graduate division of the university of california berkeley, 2003.