

低功耗 WSN 节点及其接口协议的设计

王耀兴^{1,2} 刘建军³

(重庆市国土资源和房屋勘测规划院 重庆 400020)¹ (重庆欣荣土地房屋勘测技术研究所 重庆 400020)²
(中原期货有限公司 郑州 450000)³

摘 要 提出了一种基于 MSP430 和 CC2530 的低功耗无线传感器网络节点的设计方法。从硬件和软件两个方面阐述了这种设计方法及其具体实现,通过实验完成了对节点消耗电流的测量和分析。应用结果表明,采用这种方法设计的节点能够在低功耗的条件下稳定可靠地工作。

关键词 无线传感器网络, MSP430F149, CC2530, zigbee, 低功耗

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

Design of Low-power Node and Interface Protocol in WSN

WANG Yao-xing^{1,2} LIU Jian-jun³

(Chongqing Land Resources and Housing Surveying & Planning Institute, Chongqing 400020, China)¹

(Chongqing Xinrong of Land Housing Survey Technology, Chongqing 400020, China)²

(Central China Futures Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China)³

Abstract This paper proposed a design method of low power consumption wireless sensor network (WSN) nodes based on MSP430 and CC2530. It elaborated the design and implementation from the hardware and software, and also have measured and analyzed the current consumption of the node through experiments. The results of applications prove that the nodes designed by this method can work stably and reliably under low power consumption conditions.

Keywords Wireless sensor network (WSN), MSP430F149, CC2530, Zigbee, Low-power

1 引言

无线传感器网络 (WSN) 是由随机分布的具有传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成的分布式无线网络,借助于节点中内置的形式多样的传感器协作地实时监测、感知和采集周边环境中的信息(如光强、湿度、温度、噪音和有害气体浓度等物理现象),并对这些信息进行处理后通过无线网络发送出去^[1,2]。WSN 一般由大量体积小、成本低、具有无线通信、采集数据处理能力的传感器节点组成^[3]。其由于具有低成本、可快速完成部署、组网灵活方便等优点,广泛应用于环境监测、抢险救灾、工农业生产及军事领域。然而,由于监测区域大多在野外或环境比较恶劣的地方,使得大部分网络节点只能依靠电池供电,为了尽可能在有限的电池容量下用最低能量消耗率换取尽可能大的数据采集量和信息的传送量,并尽可能地延长网络的使用寿命,一种稳定可靠、灵活方便的低功耗无线传感器网络节点的设计在整个网络中的作用至关重要。因此,本文将详细阐述一种基于 MSP430F149 微处理器和 CC2530 无线收发器的低功耗无线传感器网络节点的设计及其实现流程,并根据所设计的硬件平台实现了 zigbee 协议栈的移植。同时,在实验的基础上对整个网络工作时节点的能耗进行了测试和分析,通过理论计

算验证了以此方法设计的节点具有很好的低功耗特性,具备较长的节点生存周期。

2 硬件设计

2.1 概述

节点以 TI 公司的 MSP430F149 单片机和 CC2530 无线射频芯片为基础来实现。

MSP430F149 具有工业级 16 位 RISC 系统,支持较低的工作电压和较宽的工作电压范围。正常运行时电流为 160 μ A,关闭模式时为 0.1 μ A,具有 5 种节能工作方式^[4],可根据实际需要调整为不同的休眠模式,为设计低功耗系统提供了有利的条件。

CC2530 是 TI 公司推出新一代的低功耗无线 SoC 芯片,它符合 IEEE 802.15.4 标准和 ZigBee PRO/ZigBee RF4CE 规范,拥有 8KB 的 RAM,32/64/128/256 KB 闪存,它具有 4 种低功耗工作模式^[5],PM0 模式是完全功能模式,PM1、PM2、PM3 是 3 种睡眠模式。在全功能模式 PM0 时其接收电流 24mA,发送 1dBm 电流 27mA,PM1 模式(4 μ s 唤醒)电流 0.2mA,PM2 模式(睡眠计时器运行)电流为 1 μ A,PM3 模式(外部中断)电流为 0.4 μ A,宽电源电压范围(2V~3.6V),其无线收发时的功耗和灵敏度相比 CC2430 也有了

本文受国土资源部公益性项目:内陆开放区土地规划和监管技术研究与示范(201311006)资助。

王耀兴(1987—),男,硕士,主要研究方向为 GNSS 软件设计与开发, E-mail: cs1cs2@126.com; 刘建军(1985—),男,硕士,主要研究方向为无线传感网路。

显著提高。

传感器采用瑞士 Sensirion 公司的 SHT11 数字温湿度传感器。SHT11 传感器将温度感测、湿度感测、信号变换、A/D 转换和加热器等功能集成到一个芯片上,具有集成度高、接口简单、功耗低、测量精度高和封装尺寸小等优点。

2.2 设计原理

硬件部分主要包括数据采集模块、数据处理模块、无线收发模块和电源模块及其调试接口和扩展接口等部分组成。

数据采集部分由 MSP430F149 和温湿度传感器 SHT11 及必要外围电路组成,同时预留多路通用输入输出接口的方便扩展,无线收发部分则由 CC2530 及外围电路组成。其中 MSP430F149 作为主控处理器,CC2530 作为协作处理器和无线收发器使用,其整体架构如图 1 所示。

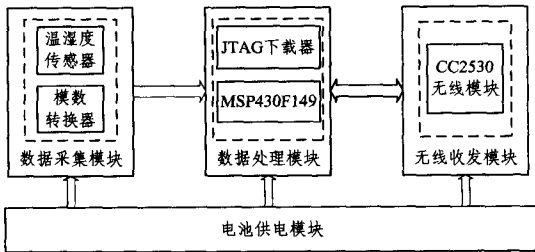


图1 整体结构

主处理器 MSP430F149 和 CC2530 通过 SPI 接口实现相互之间的数据通信,MSP430F149 另外 4 个 GPIO 分别和 CC2530 的 4 个管脚相连,可以实现 CC2530 复位、能量管理和控制 SPI 读写数据等操作。它们之间的连接如图 2 所示,SPI 由 STE、SIMO、SOMI、UCLK 4 个引脚组成,主处理器 MSP430F149 可通过 SPI 接口直接访问 CC2530 内部的寄存器和存储器,在两者相互通信时 CC2530 作为 SPI 接口的从设备,接收来自主处理器的时钟信号和片选信号,并在主处理器的控制下执行读写操作。MSP430F149 连接到 CC2530 的两根控制信号线 SRDY 和 MRDY 可以查询 SPI 的读写状态,实现中断控制等操作,CFG0 接口可用来监测 CC2530 的外部低频时钟的运行状态^[6]。

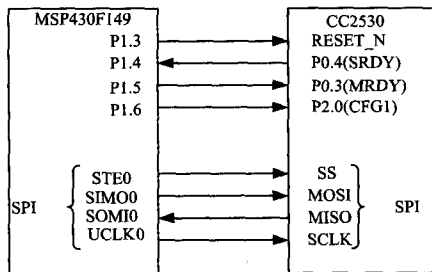


图2 SPI接口电路

2.3 接口帧命令格式

MSP430F149 通过应用层接口命令帧实现对 CC2530 及运行在它上面的 ZigBee PRO 协议栈的控制和配置操作,其帧格式如图 3 所示,这种帧格式由 3 部分组成,头部定义了帧长度,用一个字节表示,接下来是 2 个字节的帧命令类型,最后定义了帧中可以传送的 0—255 个可变长度的字节,它将根据前面 2 个字节的帧命令类型来确定要传送字节的个数和长度。

Bytes: 1	2	0—250
Length	Command	Data

图3 接口帧格式

命令字段有两个字节,包括两种命令 Cmd0 和 Cmd1,其命令格式如图 4、图 5 所示。

Cmd0	
Bits: 7—5	4—0
Type	Subsystem

图4 Cmd0 命令格式

Cmd1
7—0
ID

图5 Cmd1 命令格式

Cmd0 命令类型有以下几种:

- (1) POLL 数据轮询命令,作用是检索排队的数据。
- (2) SREQ 同步请求命令,用 SREQ 命令时,如果有事件发生或者函数调用将要求其返回一个函数值。
- (3) AREQ 异步请求命令,用 AREQ 命令时,如果有事件发生或者函数调用,将不返回函数值。
- (4) SRSP 同步响应命令,将对 SREQ 命令回复一个响应信息。

4—7 位保留。

子系统命令类型将在 0—4bits Cmd0 的前导下定义,子系统位一共有 32 个值,目前定义了 6 种类型控制接口命令,常用的 4 种命令类型如下:

1. SYS interface: 系统接口命令,MSP430 可通过这些命令访问 CC2530 的底层硬件和软件的配置信息以及外设单元的信息,例如访问及控制 CC2530 内部的 ADC、读写非易失性存储器,以及配置 CC2530 的 GPIO 等操作。
2. Configuration interface: 配置接口命令,这些命令将允许 MSP430 配置 CC2530 设备的各种配置信息。
3. Simple API interface: 简化的 zigbee 应用层接口命令,它可被用来简单配置 zigbee 网络的一些信息,例如配置设备在 zigbee 网络中的角色(如协调器、路由器或者普通节点)、设备的绑定信息和数据传输等。
4. ZDO 和 AF interface,具有完整的配置 zigbee 设备和网络的所有命令,AF 接口命令允许 MSP430 调用相应的接口函数控制 CC2530 的无线收发器接收和发送信息,注册它的应用层信息;ZDO 接口命令提供各种 zigbee 设备和网络的管理函数,可以实现设备和服务发现等操作^[7]。

Cmd0 和 Cmd1 将一起定义所有的系统接口命令,从而实现对 MSP430F149 对 CC2530 内部所有资源的配置以及对 zigbee 网络设备的管理。

3 软件设计

软件采用 IAR 开发编译平台,C 语言编程,在 TI 公司提供的 ZigBee PRO 协议栈的基础上进行应用层开发。其中 ZigBee PRO 协议栈运行在 CC2530 上,MSP430F149 可通过调用应用层接口函数,配置 zigbee 网络设备的各种参数,访问和查询 CC2530 的片上资源及其运行状态。

3.1 系统初始化

CC2530 和 MSP430F149 之间的接口层次架构如图 6 所示。

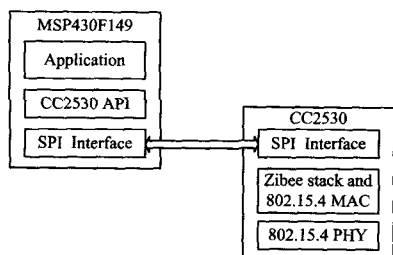


图6 协议栈层次架构

MSP430 和 CC2530 通过 SPI 接口进行通信,系统上电后,首先执行硬件初始化操作,并初始化 SPI 接口,然后进行 CC2530 初始化操作,整个初始化过程如下:

(1)调用函数 `halSpiInit()` 初始化 MSP430F149 的 SPI 接口。

(2)初始化 SPI 完毕后,系统将调用函数 `znpReset()`,该函数将 `RESET_N` 持续置低 1ms,然后置高,复位 CC2530,对 CC2530 执行初始化操作。

(3)CC2530 初始化操作完成,将返回 `SYS_RESET_IND` 消息,该消息将返回 CC2530 的硬件信息和协议栈版本信息。

(4)当 SPI 和 CC2530 都初始化完成后,系统将通过 SPI 接口发送一个 `POLL` 消息,进行 SPI 测试。

(5)测试正常完成后,系统将调用 `zapSysResetInd()` 函数,通知 ZAP 层 CC2530 初始化完成。

MSP430 和 CC2530 初始化完成后,接下来的操作是进行 zigbee 节点和网络的参数配置。

3.2 组网流程

组建一个完整的 zigbee 网络包括两个步骤:网络初始化、节点加入网络,其中节点加入网络又包括两个步骤:通过协调器连接入网和通过已有父亲节点入网。

zigbee 网络的建立是由协调器发起的,任何一个 zigbee 节点要组建一个网络必须满足以下两点要求:

(1)节点是 FFD(全功能设备)节点,具备协调器能力;

(2)节点还没有与其他网络连接,当节点已经与其他网络连接时,次节点只能作为网络的子节点,因为每个 zigbee 网络有且只能有一个网络协调器。

3.2.1 协调器工作流程

协调器是整个网络的主要控制者,它负责建立新的网络、发送网络信标、管理网络中的节点以及存储网络信息等,因此协调器在整个网络中必不可少。由于协调器一般采用市电供电,没有考虑低功耗设计。

设备上电后,首先开始节点的初始操作,配置节点类型为网络协调器,并配置相应的网络参数。各种参数配置完成后,开始进入协调器状态,进行信道扫描,对指定的信道或者默认的信道进行能量检测,选择一个能量最低、干扰最小的信道,找到合适的信道后,协调器将为网络选定一个网络标识号,开启一个网络,并允许其他设备加入网络,接下来等待是否有其它申请加入节点的无线信号,如果收到一个新节点的申请加入请求,则发送响应信息,并分配一个 16 位的网络地址,让其加入网络,整个协调器工作流程如图 7 所示。当整个网络组建完毕后,协调器开始收集各个节点定期发来的数据,经过处理后协调器将通过串口将这些信息发送给 PC 机,在 PC 机界面上就可将所监测区域的环境信息实时地显示出来。

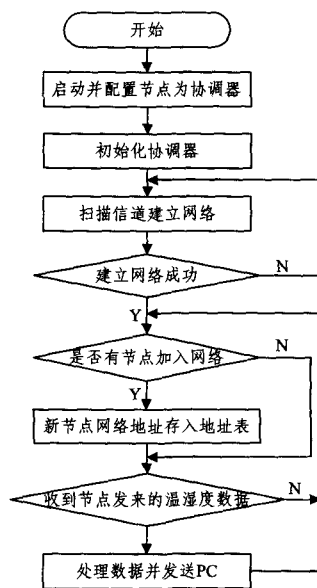


图7 协调器工作流程

3.2.2 采集节点工作流程

终端节点采用电池供电,因此在设计中要采取降低功耗的措施,MSP430F149 单片机有 5 种低功耗工作模式,分别是 LPM0、LPM1、LPM2、LPM3、LPM4,其中 LPM0 工作模式下关闭 CPU 和 MCLK(主时钟);LPM1 工作模式下关闭 CPU、MCLK、SMCLK(辅助系统时钟)和 DCO;LPM3 工作模式下 CPU、MCLK、SMCLK(子系统时钟)、DCO 以及 DC 使能禁止;LPM4 工作模式下则将 CPU 和所有的时钟全部关闭。因此,可根据实际需要,选择不同的低功耗工作模式。在进入低功耗模式工作时,用计数器来计时进行周期性的唤醒,此时,通过设置状态寄存器中的 `CPUOFF`、`OSCOFF`、`SCG0`、`SCG1` 等寄存器的值为 1011 而进入低功耗模式 3,将 CPU、MCLK、SMCLK、DCO 等全部关掉,而仅让 `ACLK`(系统辅助时钟)和计数器工作,最大限度地降低功耗。而当其需要工作时,可以使中断在不到 $1\mu s$ 的时间内将其唤醒到活动模式,响应速度很快。CC2530 在其收发器不工作时有 3 种低功耗模式,在其最低功耗模式下仅需 $0.4\mu A$ 的电流。本系统采用节点在数据采集期间 MSP430 进入 PM3 低功耗模式,休眠期间 CC2530 进入 PM2 或 PM1 的低功耗模式。

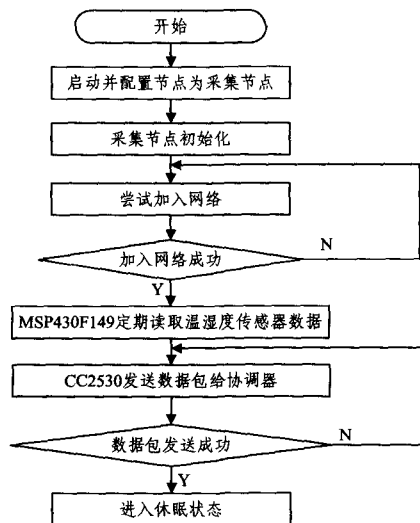


图8 节点工作流程

采集节点工作的流程如图 8 所示,节点上电后,首先初始化,配置其工作模式,然后开始扫描信道,申请加入网络,协调器或者路由器收到申请后回复响应信息,给它分配 16 位的短地址,并做记录。节点成功加入网络后,将周期性发送节点采集到的所处环境的温湿度信息,不发送数据时,节点将进入低功耗模式进行休眠,进入休眠模式时,可通过对休眠时间和设定条件情况的判断来选择节点在数据采集间隔期进入 PM2 或 PM3 模式。

4 能耗和通信距离测试

4.1 能耗测试

测试中,我们将用 6 个节点小规模组网,测试节点的能量消耗,采集节点将定期采集的温湿度信息发送给协调器,采集节点的采集时间间隔为 10s。在软件设计时 MSP430F149 微控制器的低功耗模式采用 LMP3 低功耗工作模式,CC2530 射频模块的休眠模式采用 LPM2 模式,电源采用两节南孚 AA 聚能环 5 号电池供电,两节 5 号电池电压从 3.0V 降到 2.0V(最低工作电压),其有效放电量约为 1000mAh^[8]。由于节点功耗很低,电流较小,当收发数据时,简单地用万用表测电流和电压将比较困难,在此,我们将参照 TI 的做法,在采集节点的电源电路中串联接入 10 欧姆的电阻^[9],然后使用示波器测量串入电阻两端电压的幅值变化,同时用万用表测节点进入休眠状态期间的电流为 5.4μA。使用示波器测量后计算出采集节点各个时间段消耗的电流,如表 1 所列。

表 1 节点工作各时间段电流值

事件状态	MSP430 状态	CC2530 状态	总电流 (mA)	持续时间 (ms)	Total (mA * ms)
唤醒采集数据(t1)	Normal	Normal	0.5	48.0	24.00
时钟同步处理 数据包(t2)	LPM	Normal	8.7	7.0	60.90
切换到 TX 模式(t3)	LPM	Normal	8.6	0.2	1.72
发送数据包 (t4)	LPM	TX	31.6	1.6	50.56
切换到 RX 模式(t5)	LPM	Normal	8.7	0.2	1.74
接收 MAC 层 确认信息(t6)	LPM	RX	26.7	1.0	26.70
数据处理模式 切换(t7)	LPM	Normal	8.8	5.0	44.00
求和				63.0	209.62
平均值				3.32730159	

根据所测得各阶段的电流值计算可计算出节点所消耗的平均电流:

$$(63.0 * 3.3273/1000) + (1 - 63.0/1000) * 0.0054 = 0.026328(\text{mA})$$

则节点的生命周期为电池容量除以平均消耗电流,即:

$$1000\text{mAh}/0.026328\text{mA} = 1582.6 \text{ days} = 4.33 \text{ years}$$

由计算结果可知,节点如果每 10s 发送一次所采集的数据(不发送应用层确认消息和定期数据轮询),在两节 AA 电池供电的情况下,节点可工作 4.33 年,如果设置更长的采集时间间隔,节点可工作更久;同时由表中也可看出在节点的整个工作周期内,接收和发送数据包时消耗电流较大,但持续时间相对较短,同时,MSP430F149 采集数据处理数据并通过 SPI 接口传送给 CC2530 和 CC2530 载波冲突监测也消耗了

较大的能量,但总的节点的使用寿命仍然比较理想。

4.2 通信距离测试

通信距离测试,采用两个节点进行点对点通信,分别在不同的测试环境中测试,测试在如下情况下进行:(1)在空旷的平直道路上测试;(2)两个节点分别位于教学楼的同一层的不同教室内(有墙壁阻隔);(3)两个节点在同一教学楼的不同楼层内测试。不同测试环境的测试结果如表 2 所列。

表 2 不同环境的通信距离

节点测试环境	最远距离(m)
平直道路	102
同层不同教室	38
不同楼层	31

从表中可看出,所设计节点在视距条件下具有较远的通信距离,但在有建筑物阻挡的情况下,通信距离明显缩短,一般而言,该节点可穿透 3 层墙壁阻隔通信,主要原因在于 2.5GHz 的频率,其发射波长较短,衍射能力较差,所以穿透能力较差。同时由表中也可看出节点所处的高度不同时,通信距离也会降低,如果希望通信距离更远,可通过在频射输出端加功率放大器来实现。

结束语 本文通过对 MSP430 和 CC2530 的研究和分析,设计了一种稳健可靠的低功耗无线传感器网络节点,其具有扩展方便、通信距离远、功耗低等优点,所设计的节点具有较长的使用寿命,能够满足实际需要。同时,此种设计还存在许多可以改进和优化的地方,例如可以采用动态电源管理,以进一步提高能量的有效利用率;根据通信链路质量,动态调整发射功率;采用低功耗的 MAC 和路由协议,构建合适的网络拓扑结构,下一步工作将会在这些方面做进一步的改进和优化。

参考文献

- [1] 李善仓,张克旺. 无线传感器网络原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008
- [2] 唐慧,胡向东. 无线传感器网络数据融合研究综述[J]. 通信技术,2007(7):62-63
- [3] 姜连祥,汪小燕. 无线传感器网络硬件设计综述[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2007(11):13-16
- [4] 基于 MSP430F149 的无线传感器节点的设计[J]. 传感器世界,2004(4):90-93
- [5] Texas Instruments Inc. . TPS60211 User's Manual[Z]. 2009
- [6] CC2530-ZNP Interface Specification , SWRA 3 1 2 [EB/OL]. [2010-07]. <http://www.wireless-solutions.de/products/radio-modules/im222a-zigbee-network-processor.html>
- [7] Z-StackTM API document, SWRA195 [EB/OL]. http://sensatec.googlecode.com/svn/trunk/bliografia_referencia/bibliografia_zstack.html
- [8] 艾特斯电池测评实验室. 南孚聚能环 5 号(LR6 SIZE AA)无汞碱性电池测评报告[EB/OL]. [2006-02-06]. <http://itestlab.dgzu.com/html/alkaline/2009/0211/37.html>
- [9] AN108-easuring the Power Consumption on CC2530ZNP Using CC2530 ZNP Mini Kit[EB/OL]. [2011-04]. http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=swrahttp://sensatec.googlecode.com/svn/trunk/bibliografia_referencia/bibliografia_zstack.pdf