

基于 MSP430 单片机的低功耗实时无线网络技术

吕 敏 陈仁文 董 菁

(南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

摘 要 为了解决工业现场无线传输的低成本、低功耗及实时性问题, 设计了基于 MSP430 单片机和 CC2420 的低功耗无线节点的硬件电路。采用硬件、软件及网络拓扑结构优化等方式来达到这一性能。通过一定的实验验证, 能实时地采集现场信息, 低功耗也能满足大多数工业现场的要求。这种节点可以通过组网技术、路由协议来统一管理现场, 具有实时地监控现场, 优化网络结构, 降低开销等优点。

关键词 无线节点 硬件电路 实时性 低功耗 MSP430 CC2420

中图分类号 TP368.2 TP732.1; **文献标志码** A

无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)是近几年刚兴起的。低功耗、长寿命的传感器节点是 WSN 的重要组成部分^[1]。长时间的连续工作是无线传感器节点最重要的特点。如何降低无线传感器节点的功耗, 延长它的使用寿命就至关重要。传感器网络在传输用户信息的时候也要满足实时性, 即从现场信号的采集、转换和发送, 到接收节点反馈信号产生, 再到反馈信号在现场产生作用, 整个过程都在规定的不影响系统性能的时间内完成^[2]。本文就低功耗与实时性在系统硬件电路设计和系统软件设计(包括算法级设计与系统级设计)方面做了大量的工作, 阐述了电路设计时要注意的要点, 以及软件设计流程, 为工业测控无线技术作了准备与铺垫。

1 系统硬件设计方案

传感器节点一般由以下几个模块构成: 电源系统、数据采集单元、信号调理电路、中央控制单元和数据输出模块。整个硬件框架图如下图 1 所示。

1.1 系统元器件的概述

TI 公司的 MSP430 单片机是一款超低功耗单片机。本文使用的 MSP430F149 单片机工作在低电压

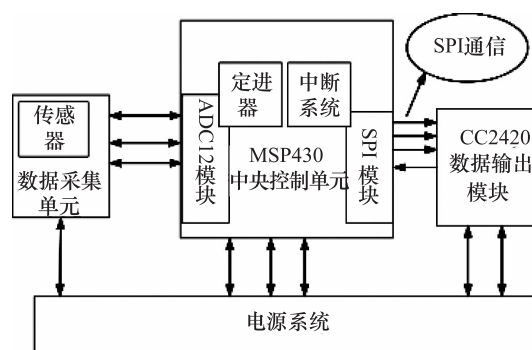


图 1 传感器节点的硬件框架图

(1.8 V ~ 3.6 V) 以及 5 种工作模式, 在等待方式下, 耗电为 0.7 μA , 在节电模式下最低可达 0.1 μA ; 独特的片外双时钟系统, 丰富的中断源可以任意嵌套, 当系统处于省电模式时, 唤醒它只需要 6 s, 完全可以满足实时性要求高的场合; 另外它还有 12 位的 200 ks/s 的 A/D 转换器, 高集成度对低功耗有很大的帮助。可见对于在低功耗与实时性要求较高的应用中, MSP430 单片机是一款性能优越的微处理器^[3]。

TI 公司 CC2420 是一款支持 IEEE802.15.4 / ZigBee 协议, 具有高度集成、低成本、低电压、低功耗等特点的芯片。它数据速率达到 250 kb/s, 超低电流消耗(发送时为 17.4 mA, 接收时为 18.8 mA)^[4]。芯片集成度高, 外围电路简单, 仅需接入晶振和极少的无源元器件即可工作, 功耗低, 尺寸小, 适合作为无线传感器节点射频芯片。

2011 年 1 月 15 日收到

第一作者简介: 吕 敏 (1987—), 男, 江苏淮安人, 汉族, 硕士研究生, 研究方向: 工业测控技术。

1.2 CC2420 与 MSP430 单片机硬件接口电路设计

MSP430 与 CC2420 的接口非常简单,如图 2 所示,CSn, SI, SO, SCLK 是 CC2420 通信 SPI 接口,与单片机 SPI 接口相连,MSP430 通过这四条线控制 CC2420;CCA 空闲信道评估,SFD 帧开始定界符,在接收与发送模式下使用,FIFOP 与 FIFO 仅在接收模式下使用,FIFOP 接单片机的外部中断引脚,触发中断函数,FIFO 用于判别触发中断的类别。实验中 MSP430 工作在主机、三线 SPI 通信模式。

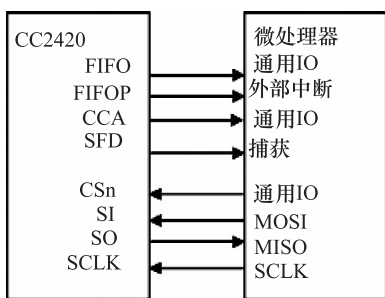


图2 微控制器与 CC2420 接口

1.3 CC2420 射频电路设计

射频电路设计是典型的高速电路,突出的问题包括时序、传输线效应、信号完整性以及串扰与干扰。解决上述问题的策略与设计方法有优化元器件的选择、传输线建模、终端匹配技术与阻抗控制等技术^[5]。CC2420 具有完全集成的压控振荡器,只需要少量的无源器件就能在 2.4 GHz 的频段工作,MSP430 通过 SPI 接口完成对 CC2420 芯片的配置和无线数据的接收与发送控制。

PCB 射频电路设计中,最重要的一个要求就是阻抗匹配。我们采用 TI 公司的微带贴片倒 F 天线,其特性阻抗为 50Ω ^[6], PCB 布线的时候特性阻抗应该设计为相匹配的值,具体参考式(1)和式(2)。

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi \sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8h}{W'} + 0.25 \frac{W'}{h} \right); \frac{W}{h} \leq 1 \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \left[\frac{W'}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W'}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1}; \quad (2)$$

$$W/h \geq 1$$

$$\text{式中 } \eta_0 = 120\pi (\Omega) \quad (3)$$

$$\frac{W'}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1.25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{4\pi W}{t} \right); \frac{W}{h} \leq 1/2\pi \quad (4)$$

$$\frac{W'}{h} = \frac{W}{h} + \frac{1.25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right); \frac{W}{h} \geq 1/2\pi \quad (5)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} F \left(\frac{W}{h} \right) - C \quad (6)$$

式(6)中

$$F(W/h) = \begin{cases} (1 + 12h/W)^{-1/2} + 0.04(1 - W/h)^2; & W/h \leq 1 \\ (1 + 12h/W)^{-1/2}; & W/h \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$C = \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{W/h} \quad (8)$$

式中: W 是微带线的宽度; t 是微带线的厚度; h 是微带线距离地平面的高度; ϵ_r 是微带线的基地的介电常数; ϵ_e 是基片的等效介电常数。当给定 W 、 h 、 t 和 ϵ_r ,则由式(1)和式(2)就可以计算微带线的特性阻抗^[7]。由于微带线的特性阻抗与 PCB 的材料特性及物理参数相关,所以 PCB 设计人员必须清楚 PCB 板材的性能。射频电路板一般都具有高频高性能的特点,通常选择介电常数精度高、稳定性好且损耗小的基材,如 FR4, TACONIC 和 ROGERS 公司的系列板材。

此外,射频电路设计还需注意,确定多层板不同板层性质;高速信号传输通道的阻抗匹配;大面积的接地,数字地与模拟地的连接,射频芯片及外围器件就近接地;充分考虑分布电容与分布电感的影响;基板板材的选择等等。这就需要设计人员的广泛了解,综合取舍;外围元件选取要依据一定的选择标准。

在射频电路 PCB 设计中,需要注意以下几点:

(1) 采用四层板,顶层作为信号层,空白的地方用过孔连接到底层,并与地平面相连,减少电磁干扰;第二层用作地平面,并且地平面不可分割,保证射频芯片在完整的地平面上方;第三层用作电源层;底层用作接地以及少量的信号传输;CC2420 芯片的下方用过孔接地。

(2) 芯片的接地引脚就近接地,电源的退耦电容尽量安放在靠近电源引脚的位置,并通过单独的过孔连接到 PCB 的接地面。

(3) 选用小封装的元器件,建议使用 0402 封装的贴片元器件。

PCB 设计软件选用了 Protel99SE,它是 PROTEL 公司推出的一款系统工具,它涵盖了以 PCB 为核心的整个物理设计。设计完成的节点的实物图如图 3 所示。



图3 射频节点实物图

2 节点无线通信的软件实现

MSP430F149 常用的软件开发环境是 IAR 公司的 IAR Embedded Workbench 嵌入式工作台, 软件架构采用状态机的形式, CC2420 的配置与接收发送流程图如下图 4 所示。发送节点(前端)与接收节点(后端)流程图相同, 所不同的是中断 1 与中断 2 的定义。对于中断 1, 在前端定义为定时器中断, 用来控制采集现场数据; 在后端为串口通信中断, 用来接收上位机的命令。对于中断 2 在前端与后端都是相同的, 为端口中断, 用来监测 FIFOP 引脚, 从无线网络中接收数据包。

前端配置具体流程如下:

Stage1 ~ Stage3: 初始化 MSP430 单片机, 包括 ADC、DAC、串口、SPI 口等;

Stage4: CC2420 芯片启动, 包括稳压器上电, 以及

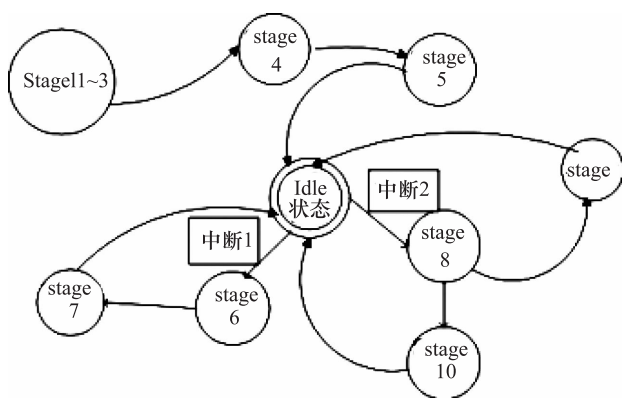


图4 CC2420 配置与接收发送流程图

晶振起振判别;

Stage5: CC2420 配置寄存器的初始化;

Idle 状态: 此处设置为低功耗的模式;

Stage6: 定时器中断来临, 启动采集数据中断函数;

Stage7: 启动 ADC12 采集数据, 处理发送出去, 再跳到 Idle 状态;

Stage8: 外部中断来临, FIFOP 上升沿到来, 启动接收命令中断函数;

Stage9: FIFO 信号为低, RXFIFO 下溢出, 清空 RXFIFO, 跳到 Idle 状态;

Stage10: FIFO 为高, 接收到数据, 读取命令, 用 DAC12 输出命令, 跳回 Idle 状态。

对发送节点而言, 中断 2 的优先级高于中断 1。但是实际上在 MSP430 单片机中定时器中断的优先级高于端口中断, 我们可以利用中断嵌套实现中断 2 优先执行。中断程序编写需要注意以下几点:

(1) MSP430 单片机默认关闭中断嵌套;

(2) 若在中断 1 中开了总中断“EINT()”, 则可以响应后来的中断 2, 不管中断 2 的优先级比中断 1 高还是低, 中断 2 执行完后再继续执行中断 1。

(3) 进入中断 2 后总中断默认关闭, 采用默认的关闭总中断。

3 低功耗的实现方法

本文采用多种方式来实现无线传感器节点的低功耗, 延长了电池的寿命, 省去了不必要的投资与麻烦。

3.1 低功耗原理与硬件电路实现

对于逻辑电路来说, 其功耗包括静态功耗和由逻辑跳变带来的动态功耗。对于射频电路来说动态功耗占到绝对比例。引起动态功耗最常见的原因包括负载电容充放电及叠加的偏置电流。由于现在逻辑器件的输出都采取了一些保护措施来减小重叠偏置电流, 所以动态功耗主要由负载电容引起, 其具体关系如下:

$$\text{动态功率} = FCV_{cc}^2 \quad (9)$$

式(9)中 F 为逻辑器件的工作频率, C 为负载电容, V_{cc} 为供电电压^[8]。所以从器件选型上来说, 应该选用供电电压低的器件, 而且器件的工作频率要低。

但是, 为了降低功耗系统大多数时候都处于休眠模式, 此时的功耗主要是静态功耗, 其衡量标准是漏电流。MSP430 单片机输入端口漏电流极低

(50 nA,远小于其他单片机的 1 A ~ 10 A),极大地降低了功耗。且具有可选择的外部时钟(8 MHz 与 32 768 Hz),低速时钟可以满足低功耗要求;CC2420 自带 1.8 V 片上稳压器供电,工作电流极低(RX:18.8 mA;TX:17.4 mA)。MSP430 可以采用 4 种不同的低功耗工作模式,而 CC2420 可以通过禁用稳压器来降低功耗。

另外应该尽可能地采用集成度高的器件,减少外围器件;PCB 布局布线时要尽量紧凑。

3.2 低功耗的软件实现

通过软件的方法,不仅可以提高系统灵活性,而且可以降低系统功耗。

第一:算法级功耗优化:首先,选择实现算法所需逻辑少的算法;其次,算法中涉及到的协处理要少;最后,灵活使用临时变量。

第二:系统级功耗管理:通常采用状态转换模式、中断唤醒机制、动态电压调节(DVS)与动态电源管理(DPM)等方式来保证系统的低功耗特性。

4 实时性分析

系统的实时性主要包括:前向通道、传输通道及后向通道的信息实时传输。前向通道与后向通道的实时性主要集中在硬件电路的设计与接口电路上;重点需要考虑的问题就是传输通道上的实时性。

由于工业现场的数据采集系统对于同步信号的要求比较高,所以同步采集也是测控网络中的基本要求,同步系统中满足实时性的措施有:

(1) 降低相同层次节点同时刻采集的数据包出现碰撞的几率:通过 TDMA 通信机制来减小这种可能性;

(2) 增加数据包接收的成功率:当发送到信道上的数据包发生碰撞时,会使信道恶化,增加误码率,可以通过降低碰撞率来增加接收成功率;

(3) 增加网络吞吐量:采用 TDMA 机制、星型网络结构、轻便的软件架构提高网络的实际吞吐量;

(4) 容错机制:CC2420 自带循环冗余校验(CRC),检错能力极强,开销小,易于用编码器及检测电路实现。

此外,硬件电路中采用的晶振每秒内会发生 ±40 s 的时间偏差,这对数据同步采集发送的影响

很大。实验中可以采用晶振漂移阵痛消除(Pains to Eliminate Crystal Drift, PECD)机制来消除连续采集过程中的晶振漂移累积^[9]。

表 1 不同网络结构的电流(单位: mA)

节点状态	网络类型		
	星型	树型	点对点
子节点 Idle	< 0.1	< 0.1	< 0.1
子节点发送	20.7	20.7	20.7
中转节点接收	/	22.3	/
中转节点发送	/	20.9	/
中转节点 Idle	/	< 0.1	/
接收节点接收	22.2	22.4	22.1
接收节点发送	20.8	21.1	20.7

5 实验结果分析

实验中分别采用“星型网络”、“树型网络”和“点对点”实现通信。电流消耗如表 1 所示。

平均看来,节点在发送与接收时电流消耗最大,但是多数情况下节点均处于 Idle 模式,电流消耗极小。室内实验中,不同网络结构单字节命令对应的延时如下表 2 所示。

表 2 不同网络结构的延时(单位: ms)

网络类型	星型	树型	点对点
延时	$13.2 \times m$	$11.5 \times n$	9.7

注: m 为“星型网络”的分支数; n 为“树型网络”的深度。

对于简单的网络结构,当 m 和 n 数值不大的时候,而且命令字节数也不大时,延迟基本能保证在 150 ms 以内,这样就可以满足简单闭环控制与大部分过程自动化控制的要求。

6 结束语

本课题涉及到了无线传感网络的硬件电路设计,射频电路板设计,以及提出了针对低功耗与实时性的设计方案。通过一系列的实验,从实验结果中可以得出对于不同的网络结构,低功耗与实时性已经能够满足大多数的工业现场要求。可以以此为基础组建更加复杂的通信网络,具体的分析与仿真有待进一步的工作。

参 考 文 献

1

Zhang Lin, Sun Hui, Sun Qiang, *et al.* Design and implementation of wireless sensor network node in environment monitoring. *Proceedings of IC-BNMT*, 2009:715—718

2

董 杰,工业通信网络实时性的分析. *农业网络信息*, 2009;1: 113—115

3

洪 利,章 扬,李世宝. *MSP430 单片机原理与应用实例详解*. 北京:北京航空航天大学出版社,2010

4

瞿 雷,刘盛德,胡咸斌. *ZigBee 技术及应用*. 北京:北京航空航天大学出版社,2007

5

邵小桃. *电磁兼容与 PCB 设计*. 北京:清华大学出版社,北京交通大学出版社,2009

6

Andersen A,应用报告 AN058. [www. ti. com. cn/rf](http://www.ti.com.cn/rf). 2007

7

(美)鲍尔 I J,布哈蒂亚 P. *微带天线*. 梁联倬,寇廷耀,译. 北京:电子工业出版社,1984

8

(美)Johnson H, Graham M. *高速数字设计-黑魔书*. 沈 立,朱来文,陈宏伟,译. 北京:电子工业出版社,2010

9

王 洋. 面向连续实时监测的无线传感器网络组网及性能优化研究. [硕士学位论文]. 南京:南京航空航天大学,2010

The Low-power and Real-time Wireless Network
Technology Based on MSP430

LÜ Min, CHEN Ren-wen, DONG Jing

(The Aeronautical Science Key Lab. for Smart Materials and Structures, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China)

[Abstract] To solve the issues of low-price, low-power and real-time in transmission process of the wireless network, the low-power wireless hardware circuit is designed which is based on the MSP430 and CC2420. Many measures are taken in hardware, software and network topology optimization to obtain this performance. By taking experimental verification, the system can collect the signal in time. Besides, in most industry environments, the requirement of the low-power be can meet. These nodes can manage the site by ways of networking technology and routing protocol, with the advantages of monitoring industry site real-timely, optimizing the network structure and reducing power consumption.

[Key words] wireless node hardware circuit real-time low-power MSP430 CC2420