

Design of a Low Power RF Wake-Up Wireless Sensor Networks*

TANG Yun-jian, LIANG Shan*, FENG Hui-wei, HUANG Chao

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The sleep/wake-up method is usually used for reducing energy consumption in wireless sensor networks. However, the sleep/wake-up method will result in the long delay of event response. We propose the low power RF (Radio Frequency) wake-up mechanism instead of the sleep/wake-up method to improve energy efficiency and fast response capability by collecting the energy from radio frequency wave. We also describe RF wake-up scheme and the architecture of the sensor node. Analyze of energy consumption and delay of nodes shows that the network with RF wake up module has the low power consumption and short delay capability.

Key words: wireless sensor networks; RF wake up; low energy consumption; real-time capability
EEACC:6150P

低功耗射频唤醒无线传感器网络设计*

唐云建, 梁山*, 冯会伟, 黄超

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 针对无线传感器网络采用睡眠/唤醒机制来实现低功耗时, 不可避免地引起网络响应时延的问题。在波束供电技术的基础上提出了无线传感器网络低功耗射频唤醒机制, 给出了低功耗射频唤醒无线传感器网络节点的硬件结构和详细设计。节点通过从电磁波中获取能量来及时地唤醒自己, 以达到提高实时性的目的。性能分析表明低功耗射频唤醒无线传感器网络节点比采用传统睡眠/唤醒机制的节点具有更高的实时性和更低的功耗。

关键词: 无线传感器网络; 射频唤醒; 低功耗; 实时性

中图分类号: TP393.05

文献标识码:A 文章编号: 1004-1699(2007)10-2328-05

无线传感器网络是由大量传感器节点组成的、面向应用的能量受限网络。无线传感器节点一般由电池供电, 长期工作在无人职守的环境, 具有数据采集计算与通讯的功能。其中, 低功耗的无线传感器网络是传感器网络研究的重点之一。

无线传感器节点通常由计算模块、通信模块、传感器模块和电源模块等四个模块组成。其中数据采集、接收、发送和计算四者能耗问题 Curt Schurges 等人做了试验, 试验结果如图 1 所示^[1], 通信模块用于节点间的数据通信, 是节点中能耗最大的部件。为了减少能量浪费, 通常在无线传感器网络中采用睡眠/唤醒机制: 节点在周围没有感兴趣的事件发生时, 关闭通信模块并让 MCU 进入睡眠状态。在一段

时间后定时器唤醒 MCU 和通信模块来接收邻居节点的数据。周期性的定时睡眠/唤醒机制很大程度上延长了节点的生命周期^[2,7]。但是, 由于节点不知道邻居节点何时会向自己传输数据, 所以通常情况下节点以一定周期的方式醒来查询或同步邻居节点。这种机制并没有解决在邻居无数据传输的时候本节

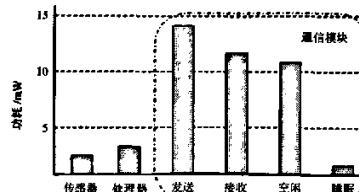


图 1 传感器节点能量消耗情况^[1]

点唤醒 MCU 和通信模块所带来的功耗浪费问题^[2],并且还带来了时延的问题,即当其它节点需要向该节点发送数据时,可能由于此节点处于睡眠状态而不能实时响应其它节点的请求。

针对以上问题,本文在波束供电技术的基础上提出一种低功耗射频唤醒无线传感器网络设计方法。包含被动射频唤醒单元的传感器网络节点,通过射频唤醒单元感知其它节点对本节点的唤醒请求,唤醒 MCU 和射频通信模块响应其它节点的事件。其时延仅仅取决于芯片的唤醒时间,从而大大提高了实时性。被动射频唤醒机制无需 MCU 在没有数据传输时唤醒射频单元,减小了无用的功耗。性能对比分析表明低功耗射频唤醒使得无线传感器网络很好地满足了低功耗与高实时性的要求。

1 低功耗射频唤醒机制

1.1 波束供电技术

根据麦克斯韦电磁场理论:变化的电场产生变化的磁场,在变化的磁场周围又会产生变化的电场,从而能量通过交变的电磁场辐射出去。接收天线能从变化电磁场中获得工作所需的能量,即通过波束供电技术将接收到的射频能量转化成直流电能为内部电路供电。波束供电的原理如图 2 所示,接收天线在电感和电容 C_1 上产生谐振电流,电流通过二极管整流后在电容 C_2 上积累电量,并提供芯片瞬间工作电流。

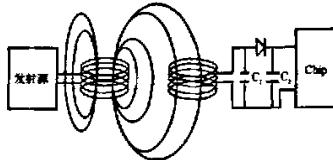


图 2 波束供电原理

接收天线通过波束供电产生的功率可由式(1)给出^[2]:

$$P_r = \frac{P_s G_s G_r \lambda^2}{(4\pi \cdot D)^2} \quad (1)$$

式中: P_r 为接收天线接产生的功率; P_s 为发送源天线的功率; G_s 为发送天线增益; G_r 为接收天线增益; λ 为电磁波波长; D 为节点间距离。由式(1)可知接收天线产生的功率 P_r 和电磁波波长 λ 的平方成正比关系。又波长 λ 和频率 f 有关系:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2)$$

式中: v 为电磁波的传播速度,为恒定值。

$$P_r = \frac{P_s G_s G_r v^2}{(4\pi \cdot D f)^2} \quad (3)$$

因此由式(3)知在发送天线增益 G_s 和接收天线增益 G_r 确定时,可以通过降低电磁波频率或者提高发射端的发射功率来获得更远的唤醒距离。

在已知接收天线的功率和接收天线的内部阻抗时,接收天线能够产生的电压为^[2]:

$$V_{in} = \sqrt{P_r R} \quad (4)$$

根据有效工作距离 D ,发送天线增益 G_s ,接收天线增益 G_r ,以及唤醒电压 V_{in} ,就可以由式(2),式(3)和式(4)得出发送天线的需求功率 P_s :

$$P_s = \frac{(4\pi \cdot D / V_{in})^2}{v R \cdot \sqrt{G_s G_r}} \quad (5)$$

当发送节点天线驱动芯片的功率不能在距离上满足需求时,可以增加功率放大模块,提高发送节点的发射功率,以满足发送天线的需求功率 P_s 。

通常波束供电产生的电流很小,无法直接用来产生 MCU 外部中断,这就需要在接收节点唤醒模块处外加放大电路来产生足够的电平触发 MCU 外部中断。而放大模块的功耗是相当低的,如:德州仪器的 TLV240x 放大器典型电流在 880 nA,所以放大模块的增加对唤醒模块的功耗影响很小^[2]。

1.2 误唤醒抑制与无效唤醒避免

无线信道干扰情况远比有线信道严重。如果射频唤醒单元在收到与载波频率相当的噪声或其它发送源的干扰信号时同样会在接收天线处产生感应电流,这时唤醒模块就会唤醒 MCU 和射频通信模块,但此时并没有数据传输,我们称这种情况下的唤醒为误唤醒,误唤醒就会造成无谓的能量损耗。为解决这一问题只需射频唤醒模块加上导频计数功能。射频唤醒单元在收到足够的导频信号之后才产生唤醒中断信号,唤醒 MCU 和射频通信模块。这样就在很大程度上避免了由误唤醒引起能量的浪费^[5]。

当节点收到不是企图唤醒自己的唤醒导频信号时,节点同样会被唤醒模块唤醒来接收数据,但此时接收的数据并不是节点需要接收的数据或称无效数据,我们称这种情况下的唤醒为无效唤醒。无效唤醒同样会带来能量的浪费。为解决这一问题,只需要在唤醒信号中加入地址标识,用来表示唤醒的对象。当唤醒模块收到唤醒导频信号后产生唤醒中断,唤醒 MCU,但这时 MCU 并不唤醒射频收发模块。唤醒模块将继续接收地址标识信息,MCU 识别地址标识,确认需要唤醒射频收发模块后才唤醒射频收发模块接收数据。这样就避免了无效唤醒带来的能量浪费。

2 低功耗射频唤醒无线传感器网络节点设计

2.1 硬件总体结构

在无线传感器网络协议中,很大部分协议并不要求所有节点都使用电池供电。如 IEEE802.15.4/Zigbee 协议,协议从功能角度将网络设备分为两种:全功能设备(FFD; Full-Function Device)和简化功能设备(RFD; Reduce-Function Device),用于全网协调功能的协调器(Coordinator)和路由功能的路由器(Router)都可是持续供电的 FFD 设备^[4],因此对功耗没有严格要求,可以常开射频模块接收数据,以保证实时性。为便于讨论低功耗射频唤醒无线传感器网络节点硬件结构,本文从能源消耗的角度将节点分为两种类型:PLD(Power Limited Device)一电能受限制设备,主要指电池供电设备,需严格限制功耗;PUD(Power Unlimited Device)一电能不受限制设备,主要指有持续电源供电的设备,无需严格限制功耗。

低功耗射频唤醒无线传感器网络节点硬件结构如图 3 所示,包括:传感器模块,微处理器模块,射频唤醒模块(RF-Wake-up Module),射频通信模块以及电源模块。相比通常的无线传感器网络节点增加了射频唤醒模块。射频模块主要由天线和内部电路组成。天线用于从电磁场中获取能量提供内部电路工作。内部电路具有放大、导频计数和产生唤醒中断的功能。

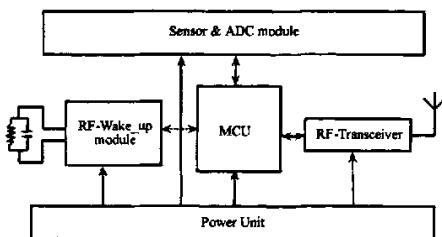


图 3 硬件结构

基于低功耗射频唤醒技术的无线传感器网络的 PLD 节点和 PUD 节点主要区别在于射频唤醒模块的不同:PLD 节点在进行无数据采集和传输任务时 MCU 和射频通信处于睡眠状态,射频唤醒模块采用微安级电流侦听载波信号,并处于常开状态以保证能实时响应其他节点。PUD 节点由于不考虑低功耗要求,射频收发模块可以处于常开状态以保证能实时响应其他节点,而射频唤醒模块仅用于发送唤醒 PLD 节点的载波导频,保证 PLD 节点能实时响应数据传输。

2.2 节点设计

本文参考 Mica2^[5] 节点的体系结构,增加射频唤醒模块。选择低功耗器件用于设计低功耗射频唤醒模块和无线传感器网络节点,节点电路原理框图如图 4 所示:

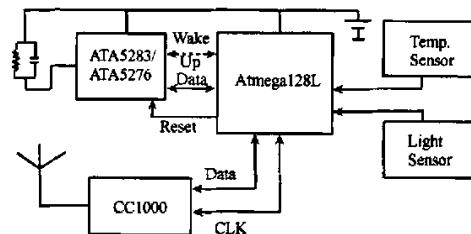


图 4 节点电路原理框图

ATMEGA128L 是一款具有 6 种睡眠模式的低功耗芯片,从睡眠模式唤醒需要 6 个时钟周期,在 8 MHz 的工作频率下,唤醒时间约 0.75 μ s^[5]。CC1000 射频收发芯片,频率选为 433 MHz 时,接收状态平均电流损耗约 7.4 mA,发射状态平均电流损耗约 15 mA,从睡眠模式唤醒需 5 ms^[6]。ATA5283 是 125 kHz 超低功耗高灵敏度射频唤醒芯片,平均侦听电流约 1 μ A,具有功率放大、导频检测功能等,唤醒需导频长度不小于 704 个载波周期,约 6 ms^[5]。ATA5276 是 125 kHz 天线驱动芯片,最大驱动电流 1.5 A,有 16 种电流驱动等级,可根据距离要求加功率放大^[5]。

Atmega128L 作为节点的主控芯片,CC1000 作为射频收发模块的控制芯片。用 Atmega128L 的 SPI 控制方式连接 CC1000。各个传感器模块接到 Atmega128L 的 ADC 引脚。其它外围模块如 LED、EEPROM、JTAG 和串行通信端口参照 Mica2 的节点设计。PLD 节点使用 ATA5283 作为 125 kHz 射频唤醒模块的控制芯片,PUD 节点使用 ATA5276 作为 125 kHz 射频唤醒模块天线驱动芯片,两者外接与之匹配的 LC 振荡电路作为接收和发射用天线装置。线圈参数可由汤姆逊公式(6),矩形线圈经验公式^[2](7)和(8)计算,在具体设计时还需要注意阻抗的匹配。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

$$L = 0.008aN^2 \left\{ 2.303 \lg \left[\frac{a}{b+c} \right] \right\} + 0.2235 \frac{b+c}{a} + 0.726 \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (8)$$

式中: f 为天线额定频率; L 为线圈电感值; C 为电容

值; N 为线圈匝数; a 为线圈中心至线圈边的垂直距离 (cm); b 为线圈绕制长度(cm); c 为线圈厚度(cm)。

ATA 5283 产生的唤醒信号连接到 Atmega128L 的外部中断引脚, ATA 5283 和 ATA 5276 的 DIO 引脚接 Atmega128L 的通用 IO 引脚以控制载波导频的长度和收发地址标识数据。根据具体应用需求, 可以增加功率放大模块提高 ATA 5276 的驱动能力, 增大唤醒距离。

3 实时性与功耗分析

由于 PUD 节点对功耗没有严格要求, 所以无线传感器网络节点的性能主要体现在 PLD 节点上。本节将对所设计的低功耗无线传感器网络 PLD 节点与传统采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点的实时性能和功耗进行分析。

假设事件在每个单位任务时间 T (如: 10 min) 内发生一次, 但发生的时刻是随机的。为保证一定实时性, 对于采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点, 要求每个 PLD 节点每个单位任务时间内醒来次数为 n , 并采用询问(poll)方式向 sink 取自己的命令数据, CC1000 在 433 MHz 频段的最大数据传输速率为 19.2 kbit/s^[6], 可以计算一条 127 byte 的消息传输花费时间为 53 ms 左右, 加上处理时间和载波侦听退避时间, 所以设置唤醒后保持侦听时间长度 $T_{\text{listen}} = 100 \text{ ms}$ 比较合理。对于采用射频唤醒机制的 PLD 节点, 当没有任务时 MCU 和射频收发模块均处于睡眠状态, 唤醒模块一直保持侦听状态。当接收到唤醒信号后, 由唤醒模块唤醒 MCU 和射频收发模块, 接收数据并处理完数据后, MCU 和射频收发模块继续睡眠。两种工作方式如图 5 所示。

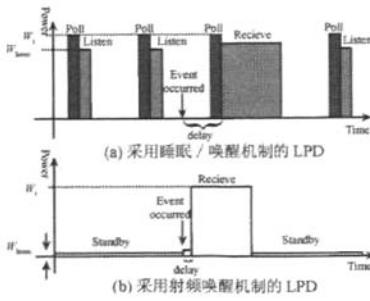


图 5 工作方式图

(1) 平均时延对比

在实时性方面 PLD 节点的最大时延可表示为:

$$t_{\max} = t_{\text{sleep}} + t_{\text{wake-up}} \quad (9)$$

其中: t_{sleep} 为睡眠时间, $t_{\text{wake-up}}$ 为唤醒时间。

最小时延为:

$$t_{\min} = t_{\text{wake-up}} \quad (10)$$

则平均时延为:

$$\bar{t} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} \quad (11)$$

对于采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点, 其 MCU 及其射频部分的唤醒时间和睡眠时间的关系为 $t_{\text{wake-up}} \ll t_{\text{sleep}}$, 则 $t_{\max} \approx \frac{t_{\text{sleep}}}{n}$, 平均时延 $\bar{t} \approx \frac{t_{\max}}{n}$ 。

而采用射频唤醒机制的 PLD 节点的睡眠时间为 t_{sleep} , 则 $t_{\max} = t_{\text{wake-up}}$, 其平均时延:

$$\bar{t} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} = \frac{t_{\text{wake-up}} + t_{\text{wake-up}}}{2} = t_{\text{wake-up}}$$

由于芯片的唤醒时间是毫秒级^[4], 故有 $t_{\text{wake-up}} \ll t_{\text{sleep}}$, 平均时延 $\bar{t} < t$ 。

明显地, 采用射频唤醒机制的 PLD 的节点比采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点有更好的实时性能。

(2) 平均功耗对比

PLD 节点的单位任务时间的能耗为:

$$w = w_{\text{Tx}} + w_{\text{Rx}} + w_{\text{sensor}} + w_{\text{listen}} + w_{\text{other}} \quad (12)$$

式中: w 为单位时间总能耗; w_{Tx} 为发送数据能耗; w_{Rx} 为接收数据能耗; w_{sensor} 为采集数据能耗; w_{listen} 为侦听数据能耗; w_{other} 为其他能耗。

采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点与采用射频唤醒机制的 PLD 节点在 w_{Rx} , w_{sensor} 和 w_{other} 上没有本质区别, 而主要区别在于 w_{listen} 和采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点询问数据时能耗的 w_{Tx} , 如图 5 所示。将能耗转换为毫安时(mAh)来表示:

$$w_{\text{listen}} \propto I_{\text{listen}} \times T_{\text{listen}} \quad (13)$$

式中: I_{listen} 为侦听时平均电流, T_{listen} 为侦听时间。

由式(13)可知, 采用睡眠/唤醒机制的 PLD 节点在侦听时的能耗可表示为:

$$n \times I_{\text{listen}} \times T_{\text{listen}} = n \times (7.4 \times 10^{-1})$$

其侦听能耗随单位任务时间内侦听次数 n 的增加而增加, 单位任务时间与能耗的关系如图 6 所示。而使用了射频唤醒机制的 PLD 节点的能耗为:

$$I_{\text{listen}} \times T_{\text{listen}} = 1 \times 10^{-3} \times T$$

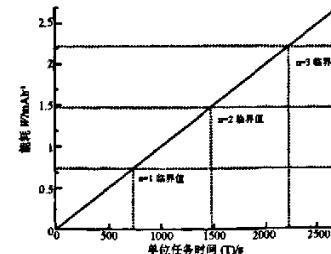


图 6 任务时间和能耗关系

由图 6 可知, 在临界值以下有如下关系:

$$w_{\text{listen}} > w'_{\text{listen}}$$

另外,采用射频唤醒机制的PLD节点询问数据能耗 $w_{\text{rx}}=0$,所以有:

$$w > w'$$

显然,采用睡眠/唤醒机制的PLD节点的平均能耗大于采用射频唤醒机制的PLD节点的平均能耗。

综上所述采用了低功耗射频唤醒技术的节点比没有采用低功耗射频唤醒技术的节点,在实时性能和功耗两个方面同时取得了更好的性能。

4 结束语

本文提出了一种低功耗射频唤醒无线传感器网络的设计方法。所提出的无线传感器网络节点通过一个独立的射频唤醒单元感应载波信号,并产生唤醒信号唤醒MCU,从而唤醒射频收发单元。与传统采用周期性唤醒机制的节点相比,所提出的低功耗射频无线传感器网络节点具有更好的低功耗和实时性能。本文提出的唤醒机制将在一定程度上改善无线传感器网络通讯协议的设计,特别是低功耗实时性路由设计及其自适应机制研究。

参考文献:

- [1] Curt Schurgers, Vlasisos Tsatsis, Saurabh Ganeriwal, Srivastava Mani B, Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, January-March 2002, 1(1), 70-80.

- [2] Lin Gu and John A. Stankovic. Radio-Triggered Wake-up Capability for Wireless Sensor Networks[J]. Real-Time Systems, 2005, 29(2), 157-182.
- [3] 杜雪亮,戴华平,吴烈 无源电感耦合式射频识别系统天线的设计和优化[J]. 江南大学学报(自然科学版),2004,3(6).
- [4] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (IrWPANS), Oct. 2003.
- [5] Atmega128L, ATA5283, ATA5276 DataSheets[EB/OL]. <http://www.atmel.com>.
- [6] CC1000 DataSheet[EB/OL]. http://www.chipcn.com/files/CC_1000_DataSheet_2_2.pdf.
- [7] Shi Xiaolei, Guido Stromberg, Yvonne Gsottberger, Thomas Sturm. Wake-Up-Frame Scheme for Ultra Low PowerWireless Transceivers Global [C]// IEEE Telecommunications Conference, 2004, 6.
- [8] Hill Jason L, Culler David E, Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks[J]. IEEE Micro, November 2002, 22(6), 12-24.



唐云建(1981-),男,重庆北碚人,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式技术,cqu_tyj@126.com



梁山(1967-),男,四川泸州人,教授,主要研究方向为精密跟踪伺服控制及数字控制技术,嵌入式系统,传感器网络,lightsun@cqu.edu.cn