

无线传感器网络节点能耗状态转换模型研究

张 骏, 向 渝, 汪文勇

(电子科技大学计算机学院 成都 610054)

【摘要】针对无线传感器网络节点的能量管理与优化问题,对无线传感器网络节点中主要的功率可管理部件工作状态进行分析,建立了MCU处理器、模数转换器和无线收发模块之间的状态转换关系模型。详细阐述了器件间的状态转换关系和条件,并给出了多种休眠模式间的转换时间阈值的估计方法。该模型反映了无线传感器网络节点实际工作状态的状态转换关系,为节点的动态能耗管理的优化设计提供了实际应用参考。

关键词 能耗管理; 优化; 状态转换; 无线传感器网络

中图分类号 TP393

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.028

Research on Power State Transition Model Wireless Sensor Network Node

ZHANG Jun, XIANG Yu, and WANG Wen-yong

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract For energy management and optimization of wireless sensor network (WSN) nodes, a power state transition model of WSN node is proposed through the analysis of the operation of the main energy consuming components within the node. The model describes the relations and conditions of the transitions of WSN node between different states with different power levels. Since more energy can be reserved when the node is scheduled into the appropriate states with lower power level, a method is introduced to determine the time thresholds for the state transitions. The optimal decision of the time thresholds is based on Markov strategy with certainty. This model can supply a good reference for the design of the dynamic power management of WSN nodes.

Key words energy management; optimization; state transition; wireless sensor network

无线传感器网络^[1-2](wireless sensor network, WSN)常部署于人类难以接近的区域,执行长期的监测和控制任务,网络生存时间要求长达数月或数年。而WSN节点一般采用容量有限的电池供电,因此,如何降低节点能耗、延长电池使用寿命成为WSN软硬件设计的核心问题^[3-4]。

本文针对功率可管理部件(power manageable component, PMC)^[5]所带来的系统能耗优化潜力,从WSN节点的整体角度出发,对节点的各主要能耗部件的工作状态、转换关系和控制信号交换进行了分析和建模。基于该状态转换关系模型,操作系统中的能耗管理机制能够根据节点运行负载的变化,调整PMC器件的工作状态,达到了降低节点整体能耗的目的^[6]。

1 WSN节点组成结构与能耗分析

通用的WSN节点由电源、数据获取单元、数据

处理单元、数据传输单元4个部分构成。

1.1 数据获取单元

数据获取单元主要包括物理传感器和模数转换器ADC。能耗主要来自于传感器的数据采集以及模数转换器的模数转换操作。

1.2 数据处理单元

数据处理单元主要包括处理器芯片、操作系统和应用软件。能耗主要来自于MCU处理器芯片。低功耗MCU具有多种状态模式,在不同状态模式下的能耗指标和工作时长对节点能耗产生很大的影响。

1.3 数据传输单元

数据传输单元主要由无线收发模块(wireless transmitting & receiving module, WTRM)构成。能耗主要来自于射频和基带电路,与调制方式、传输速率、收发功率和操作周期有密切关系,在节点整体能耗中占有很大的比例。

收稿日期: 2007-09-31; 修回日期: 2008-04-17

基金项目: 国家发改委下一代互联网示范工程研究开发、产业化及应用试验项目(CNGI-04-01-1D)

作者简介: 张 骏(1972-),男,在职博士生,主要从事计算机网络通信、计算机技术与应用等方面的研究。

2 PMC器件状态转换分析

随着具有多种工作状态的PMC器件在无线传感器网络节点中的逐步应用, 可以通过动态功耗管理(dynamic power management, DPM)^[7]技术, 根据负载的变化动态调整PMC器件状态, 使其尽可能处于休眠等低功耗状态, 从而达到降低节点整体能耗的目的。因此, 动态功耗管理的核心问题是基于事件驱动的状态转换策略。本文的状态转换分析对象是节点的主要能耗部件, 即ADC、MCU和WTRM。

2.1 MCU状态分析

MCU具有活跃和休眠两种状态。MCU在执行数据计算处理时处于活跃状态, 能耗由MCU的峰值能耗表征。在空闲时MCU处于休眠状态, 能耗显著降低。由于MCU在节点控制中的核心地位, 因此MCU的休眠将导致整个节点处于休眠状态。通过用户预定义的定时重启或者外部中断信号触发方式, 可以将MCU从休眠状态唤醒, 进入活跃状态, 如图1所示。

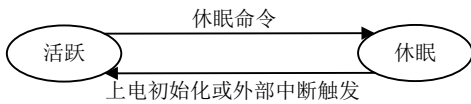


图1 MCU状态转换

2.2 ADC状态分析

ADC的通用工作状态有活跃和休眠两种。ADC的状态转换是由MCU根据预定义的监测任务进行控制。在不执行数据采集任务时, ADC进入休眠状态。当周期任务到达或者有外部命令触发中断时被唤醒, 并进入活跃状态, 如图2所示。

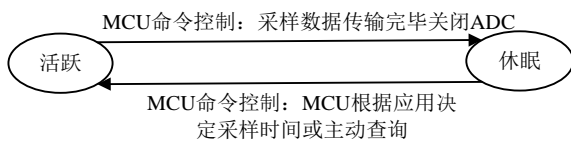


图2 ADC状态转换

2.3 WTRM状态转换

WTRM具有休眠、发送和接收3种工作状态, 具有不同的能耗指标。在休眠状态时不能发送或接收数据; 在发送状态且信道空闲, 则发送数据, 否则回退等待; 在接收状态监听信道, 若有数据到达则进行接收。WTRM在3种状态之间的转换由MCU发出的命令控制, 或者按照WTRM的设计规程自动进行, 如图3所示。

为了体现实际指导意义, 本文以具有代表性的低功耗无线射频器件Chipcon CC2420^[8]为例说明所使用的控制命令。STXON命令表示发送使能;

SRXON表示接收使能; SRFOFF表示关闭收发和混频器; SXOSCON表示启动晶振; SXOSCOFF表示关闭晶振和射频; STXONCCA表示如果检测到信道空闲, 则发送使能。

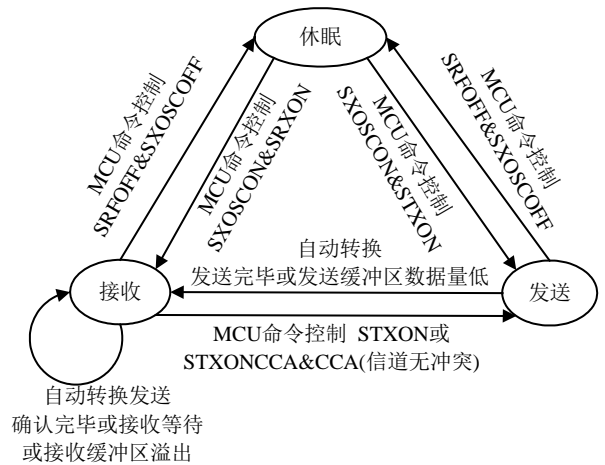


图3 WTRM状态转换

3 节点状态转换分析与设计

3.1 节点状态转换关系模型

由于MCU、ADC和WTRM是WSN节点主要的功能组成部件, 因此, 本文建立节点的整体状态转换关系模型如图4所示。

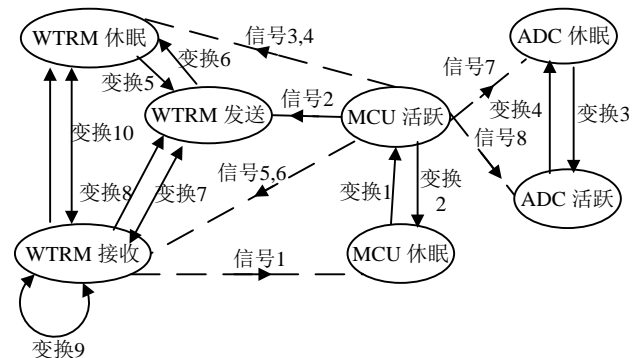


图4 节点状态转换关系

在实际系统中, ADC和WTRM的状态转换主要是在MCU的控制下进行。MCU通过指定的命令驱动ADC和WTRM转换到对应状态, 因此MCU在整个节点状态转换中起着核心控制作用。

基于图4中的状态及转换关系, 在操作系统中设计实现负责节点状态管理的模块——能耗管理器(power manager, PM)。能耗管理器控制MCU、ADC和WTRM, 根据当前状态和转换条件在各自的状态间进行切换。而驱动这些器件进行状态转换的外部激励条件就是图4中的信号。

信号1~8表示两种与状态转换有关的激励信

号,即MCU发出的控制命令和中断信号。信号1表示WTRM在接收状态时,当检测到有效的帧起始标志符(start of frame delimiter, SFD)或接收缓冲区已满时触发的外部中断信号,它使MCU从休眠状态转换到活跃状态。

信号2~8是MCU发出的控制命令,其功能定义和使用方式由ADC或WTRM器件的设计或使用手册给出。通过设置器件相应的管脚电平或控制寄存器的位,使ADC或WTRM按设计规程执行对应操作。信号7或信号8根据ADC的管脚定义,对PWRDN管脚电平置高或置低,使ADC切换到活跃或休眠状态。而对WTRM的控制命令(信号2~6)则通过对其控制寄存器的设置实现状态变换。

通过上述分析,图4中信号和变换的情况分别如表1和表2所示。

表1 状态转换激励信号

序号	信号含义
信号1	WTRM外部中断: SFD检测或接收缓冲区溢出
信号2	MCU控制命令SRFOFF&SXOSCOFF
信号3	MCU控制命令SXOSCON&STXON
信号4	MCU控制命令SXOSCON&SRXON
信号5	MCU控制命令STXON或(STXONCCA&CCA)
信号6	MCU控制命令SRFOFF&SXOSCOFF
信号7	MCU控制命令: MCU根据应用决定采样时间或主动查询, PWRDN置高
信号8	MCU控制命令: 采样完毕关闭ADC, PWRDN置低

表2 状态转换描述

变换	信号	变换
1	1	定时自启或响应外部中断
2	无	执行休眠命令
3	7	执行MCU控制命令: MCU根据应用决定采样时间或主动查询, PWRDN置高
4	8	执行MCU控制命令: 采样完毕关闭ADC, PWRDN置低
5	3	执行MCU控制命令SXOSCON&STXON
6	2	执行MCU控制命令SRFOFF&SXOSCOFF
7	无	自动转换: 发送完毕或发送缓冲区数据量低
8	5	执行MCU控制命令STXON或(STXONCCA&CCA)
9	无	自动转换: 发送确认完毕或接收等待或接收缓冲区溢出
10	4	执行MCU控制命令SXOSCON&SRXON
11	6	执行MCU控制命令SRFOFF&SXOSCOFF

3.2 休眠状态转换时间阈值的确定

器件的休眠是指部分高能耗功能电路关闭,而不同深度的休眠状态是在上一级状态基础上,进一步增加关闭的功能电路种类和数量,这些休眠状态没有本质区别。实际的PMC器件都提供具有不同休

眠深度的多种休眠状态,休眠深度越深,器件的能耗越低。本文讨论器件之间的状态转换关系时,不失一般性地表明每种器件只使用了一种休眠状态来表征低功耗休眠状态。

对于具有多种休眠状态的PMC,能耗管理器在满足性能要求的情况下动态调整休眠深度,达到进一步降低能耗的目的。休眠深度的动态调整策略主要是确定进入相应休眠状态的时间阈值。

从WSN应用角度分析,状态转换时间阈值的确定与引起节点在不同状态之间(包括不同深度的休眠状态和活跃状态)进行转换的事件有关。事件分为以下两类:(1)节点自身根据预定义的任务执行数据采集等工作,具有较明确的周期等时间特征,因此由此类事件引起的节点状态转换在时间上具有一定的确定性。(2)与WSN多跳中继的数据传递方式有关。每个节点既是本地数据的源节点,也可能是其他节点传输路径上的中继转发节点,因此,由网络转发流量事件引起的状态转换在时间上具有不确定性。

为了有效地节约能耗,使PMC进入合适的休眠状态,需对此类不确定性时间值进行预先估计和设定。因此,能耗管理器应基于WSN中业务流量特征的分析,估计和确定进入不同休眠状态的时间阈值。

已有的实验研究和文献证明,网络业务流量具有自相似特征^[9],服务时间和空闲时间服从重尾分布^[10]。在设计能耗管理器控制PMC状态转换的算法时,最优的策略是确定性马尔可夫策略,即超时策略^[11-12]。预先设定一系列超时阈值,一旦持续空闲时间超过某一阈值,就转换到具有相应休眠深度的状态。阈值可以固定,也可以随负载变化自适应调整,因此,算法的关键是对超时阈值的确定。

超时策略的总期望能耗为:

$$E = \int_0^{\kappa_1} w_0 t dF(t) + \sum_{k=1}^K \int_{\kappa_k}^{\kappa_{k+1}} \{w_k(t - \kappa_k) + e_k + \sum_{l=0}^{k-1} [w_l(\kappa_{l+1} - \kappa_l) + e_{l,l+1}]\} dF(t) \quad (1)$$

式中 K 为PMC具有的休眠状态数,按能耗由高到低依次为 S_1, S_2, \dots, S_k ; w_k 为 S_k 的能耗;空闲状态Idle记为 S_0 ; w_0 为能耗; e_{kl} 为由状态 S_k 转换到 S_l 的平均能耗; e_k 为由 S_k 转换到活跃状态的能耗; $F(t)$ 为空闲时间分布函数。如果PMC空闲时间大于 κ_k ,则转换到休眠状态 S_k 。因此,对超时阈值的确定问题转化为多元函数的极值问题,即:

$$E = \underset{0 \leq \kappa_1 \leq \kappa_2 \leq \dots \leq \kappa_k}{\text{Min}} f(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_k)$$

在已知空闲时间分布函数和PMC相关能耗参数的情况下, 代入式(1)可将超时阈值的决策转化为可求解的参数估计与决策问题。

根据对超时阈值的合理估计和设置, 能耗管理器就可以在满足WSN功能和性能的要求下, 将空闲时间的累计值与超时阈值比较而产生进入不同深度休眠状态的决策, 获得良好的能耗优化效果。

4 结束语

能耗优化问题始终是无线传感器网络软硬件设计与应用的核心问题和最大挑战。本文对无线传感器网络节点功能组成以及各组成部分的主要能耗来源进行了描述。针对PMC部件的多种工作状态特性, 分析了节点中主要PMC的状态转换, 建立了节点状态转换模型。该模型反映了实际无线传感器网络节点中的各个PMC器件间的状态转换关系和激励信号关系, 对以PMC器件状态转换为基础的无线传感器网络节点能耗优化方法研究、嵌入式操作系统中能耗管理器的设计和实现, 提供了较全面的设计和参考依据。

参 考 文 献

- [1] AKYILDIZ I F, SU W L, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor network[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] 孙利民, 李建中, 陈 渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
SUN Li-min, LI Jian-zhong, CHEN Yu, et al. Wireless sensor network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [3] HILL J, SZEWCZYK R, WOO A, et al. System architecture directions for networked sensors[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. Cambridge, MA: ACM, 2000: 93-104.
- [4] RABAEY J M, AMMER M J, Julio Leao da Silva Jr, et al. Picoradio supports Ad hoc ultra-low power wireless networking[J]. IEEE Computer, 2000, 33(7): 42-48.
- [5] BENINI L, DE MICHELI G. System-level power optimization: techniques and tools[J]. ACM Trans on Design Automation of Electronic Systems, 2000, 5(2): 115-192.
- [6] SINHA A, CHANDRAKASAN A. Dynamic power management in wireless sensor networks[J]. IEEE Design & Test of Computers, 2001, 18(2): 62-74.
- [7] BENINI L, BOGLIOLO A, DE MICHELI G. A survey of design techniques for system-level dynamic power management[J]. IEEE Trans on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2000, 8(3): 299-316.
- [8] Texas Instruments. Chipcon smartRF CC2420 datasheet (rev1.3)[OB/OL]. [2005-10-03]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>.
- [9] TAQUU M S, WILLINGER W, SHERMAN R. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling[J]. ACM Computer Communications Review, 1997, 27(2): 5-23.
- [10] SIMUNIC T, BENINI L, GLYNN P, et al. Event-driven power management[J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2001, 20(7): 840-856.
- [11] 储 毅, 赵 敏. 基于马尔可夫决策的动态电源管理技术[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(3): 521-523.
CHU Yi, ZHAO Min. Dynamic power management based on markov process[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(3): 521-523.
- [12] 吴 琦, 熊光泽. 非平稳自相似业务下自适应动态功耗管理[J]. 软件学报, 2005, 16(8): 1499-1505.
WU Qi, XIONG Guang-ze. Adaptive dynamic power management for non-stationary self-similar requests[J]. Journal of Software, 2005, 16(8): 1499-1505.

编 辑 黄 莘