

基于状态转移的感知节点能耗模型研究与设计*

周海鹰, 徐杰, 高妍, 谢和平, 左德承, 李剑, 周鹏

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对基于理论模型的感知节点能耗研究通常仅考虑部件能耗、缺少从节点整体上分析与评估系统能耗问题的现状,通过分析节点部件在状态运行以及状态变迁时的能耗状况;基于状态转移的矩阵建模方式建立部件能耗模型;基于事件触发机制明确系统主要能耗部件之间的关联,建立节点整体的能耗模型。在 OPNET 上仿真验证了本模型的可靠性及实用性。仿真结果证明,本模型可为节点选型、协议评测以及网络构建分析提供模型支持和理论指导。

关键词: 无线感知网; 节点能耗模型; 事件触发; 网络生存时间; OPNET 仿真

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)09-3432-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.062

Research and design on energy model of sensor node based on state transition

ZHOU Hai-ying, XU Jie, GAO Yan, XIE He-ping, ZUO De-cheng, LI Jian, ZHOU Peng

(School of Computer Science & Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The energy-consumption models are now almost deduced from the theoretical model, only taking the communication module and processor into account without an overall analysis and assessment for the energy-consumption of nodal system. Based on the matrix modeling of state transition, this paper analyzed the energy consumption within all states and between the state transitions, and established their energy-consumption models respectively, and then revealed the energy consumption features of node modules. Moreover, considering in event-driven mechanism, this paper established a unified energy-consumption model by defining a clear correlation among the modules of a node, and then tested the reliability and usefulness of this model in the OPNET. The simulation results show this energy-consumption model can provide theoretical guidance for component selection, protocol evaluation as well as network analysis.

Key words: WSN(wireless sensor networks); energy-consumption model; event-driven; network lifetime; OPNET simulation

无线感知网(WSN)是由低成本、微型化、低功耗的感知节点所组成的具有信息捕获以及收发的自组织网络。感知节点的处理能力一般都比较弱且存储容量比较小,无线收发模块的通信速率比较低、通信距离非常短,自身所携带电池的能量十分有限。无线感知网的网络生存时间与节点能量息息相关:
a)在大多数典型的感知网应用中,感知节点被作为一次性消费品,只能依靠自身携带的或者自主获取的能源(太阳能,电池)供电;
b)无线感知网的许多应用却要求感知网能够具有足够长的生存时间。因此,如何节省节点能量,延长节点的寿命,从而延长整个网络的生存时间是无线感知网所需解决的重要问题。本文通过分析节点主要能耗模块在状态运行以及状态变迁时的能耗情况,建立各能耗模块的能耗模型,并基于事件驱动机制,明确系统主要能耗模块之间的关联,建立起节点整体的能耗模型,并在 OPNET 上仿真验证本模型的可靠性以及实用性。

1 节点能耗建模技术研究现状

为了减少能量的损耗,达到延长 WSN 生存时间的目的,人们开展了大量的研究。自 20 世纪 70 年代以来,在基础理论研究方面已经取得了很好地发展,但对一些关键技术的研究还不够成熟,特别是节点能耗建模还需进一步完善。

基于传感器节点硬件的能量优化策略比较流行的有动态能源管理技术(DPM)^[1]。它是一种利用关闭节点的空闲部件来节省能量的能源管理机制。如何合理地使传感器节点或其部件在不同的工作状态下切换是 DPM 技术的核心问题。另一方面,动态电压调节(DVS)^[2]也是节约能量的一个很好的策略,DVS 的工作原理是:当计算负载较低时,通过降低微处理器的工作电压和频率,从而降低处理能力以节约微处理器的能耗;尽量使用中断让处理器进入更深的睡眠,可以节约微处理器的能耗。

对无线感知网能耗最传统的一种建模方法是根据传感器

收稿日期: 2011-11-30; **修回日期:** 2012-01-06 **基金项目:** 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金资助项目(2009RFLXG009); 国家科技部国际科技合作计划资助项目(2010DFA14400)

作者简介: 周海鹰(1975-),男,湖北松滋人,副教授,博士,主要研究方向为移动计算、服务计算等(haiyingzhou@hit.edu.cn);徐杰(1988-),男,湖南长沙人,硕士,主要研究方向为 WSN、移动计算等;高妍(1986-),女,黑龙江绥化人,硕士,主要研究方向为 WSN、移动计算等;谢和平(1989-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为 WSN 能耗建模等;左德承(1972-),男,黑龙江五常人,教授,博导,主要研究方向为容错与移动计算等;李剑(1976-),女,湖北十堰人,博士研究生,主要研究方向为 WSN、移动计算等;周鹏(1987-),男,浙江台州人,博士研究生,主要研究方向为计算机性能评测、移动计算等。

节点各功能模块的理论能耗数据、公式或理论模型来推演节点的能耗状况,由节点能耗模型再推导整个网络的能耗模型。文献[3]仅把节点的发送和接收数据作为主要能耗考虑,引用了一个简化的模型,使用基于最小跳数技术的加权平均算法,建立了坐标系下正方形网络的能耗模型,推导出更为准确的正方形网络的能耗表达式,虽然解决了能耗表达式模糊的问题,但能量损耗考虑不够周全。文献[4]采用电磁场能量扩散理论、电路能量消耗理论和技术,推导出传感器网络中普通节点、汇聚节点和簇头节点的能耗模型。该方法局限于单跳传输方式下网络的理论能耗模型及其分析计算。文献[5]将节点分为工作(R(发送、接收)和N(只发送)阶段)和睡眠两个状态,在理想情况下建立节点能耗模型和网络能耗模型,就节点通信干涉情况建立干涉模型,主要为求得前面模型中的一些具体参数,如节点发送数据概率。文献[6]提出了 WSN 数据链路层的一种综合能耗模型,分析了网络层、物理层和信道以及数据链路层各功能模块对 WSN 网络能耗的影响,最后通过仿真说明了该综合能量模型中参数的合理选择(如功率控制方式的选择)可大大改善 WSN 能量消耗性能。该能耗经验式及其参数需进一步研究与精确化。

综上所述,大多数能耗建模研究都很少从节点整体的角度考虑能耗问题。少数研究试图从整体上对节点能耗进行建模,但存在以下问题,如通常过于简化节点状态、未考虑节点状态转换能耗及转换之间的时间约束等。因此,实现一个能准确反映传感器节点整体能耗情况的模型显得至关重要。

2 基于状态转换的节点能耗建模

2.1 能耗计算推导

无线感知网节点一般由四部分组成,即 CPU 模块、RF 模块、sensor 模块和能量供应模块。其中能耗主要集中在 RF 模块、CPU 模块和 sensor 模块。在上述的能耗模块中,各个模块的能量消耗各不相同,其在节点整体能耗中所占比例如图 1 所示。

本文提出的基于状态转换的能耗模型将能耗分成两部分: a) 状态能耗($E_s, s \in S_s$),即为处于各个状态的能耗,如 RF 模块处于发送状态时消耗的能量;b) 转换能耗($E_c, c \in S_c$),即为为转换造成的损耗。一个能耗模块不同状态的转换虽然时间很短,但是其过程的能量损失不可忽略,因此将这部分能耗计算在内。其中 S_s 是一个模块所有状态的集合,而 S_c 是由 S_s 中所有状态之间的转换所构成的集合。因此, $S_c = \{c: m \rightarrow n, m, n \in S_s\}$ 。

由此,一个能耗模块的能耗计算可由式(1)计算为

$$E = E_s + E_c = P_s \times T_s + P_c \times T_c \quad (1)$$

其中: P_s 是某个状态下的功率,对于某一款特定的硬件设备,它是一个常数。而将 P_c 定义为相邻转换状态的功率的平均值,即

$$P_{c:m \rightarrow n} = (P_m + P_n) / 2 \quad (2)$$

T_c 是某种状态的持续时间。 $T_{c:m \rightarrow n}$ 为两种状态转换的次数。因此节点的能耗计算公式为

$$E = \sum_{i \in S_s, j \in S_s} (E_i + E_j) = \sum_{i \in S_s} P_i \times T_i + \sum_{j \in S_c} P_j \times T_j = \sum_{i \in S_s} P_i \times T_i + \sum_{j=m \rightarrow n, j \in S_c} (P_m + P_n) / 2 \times T_{m \rightarrow n} \quad (3)$$

其中: P_i, P_j 以及 T_j 是常数,因此计算节点能耗的关键就在于如何统计处于某种状态的持续时间 T_i 。

2.2 节点转换的时间界定

本文提出的能耗模型是基于 DPM(休眠技术)来降低能耗的。正是由于状态转换能耗的存在,会出现这样一种情况:频繁的状态转换所消耗的能量比一直处于某一高能耗模式时,所消耗的能量要多,所以节点在各个状态之间的转换并不是一定可行,需要受到一定的时间约束,即时间界定^[7]。为了避免上述情况的出现,本文采用如下的时间界定方法:若进行状态转换所消耗的能量 E_{change} 小于一直处于某高能耗状态(m)下 E_m 所消耗的能量,则进行状态转换;否则保持在高能耗状态。 E_{change} 的计算为

$$E_{change} = E_{m \rightarrow n} + E_n + E_{n \rightarrow m} = P_{m \rightarrow n} \times T_{m \rightarrow n} + P_n \times T_n + P_{n \rightarrow m} \times T_{n \rightarrow m} \quad (4)$$

因此,状态转换的能量节省如式(5)所示。

$$E_{save} = E_m - E_{change} = P_m \times T_m - P_{m \rightarrow n} \times T_{m \rightarrow n} - P_{n \rightarrow m} \times T_{n \rightarrow m} = P_m \times T_m - \frac{P_m + P_n}{2} \times T_{m \rightarrow n} - P_n \times T_n - \frac{P_n + P_m}{2} \times T_{n \rightarrow m} = (P_m - P_n) \times T_m - \frac{P_m - P_n}{2} \times T_{m \rightarrow n} - \frac{P_m + P_n}{2} \times T_{n \rightarrow m} \quad (5)$$

当 $E_{save} > 0$ 时,进行状态转换才能节省能量,即状态转移的时间约束条件满足

$$T_m \geq \frac{1}{2} (T_{m \rightarrow n} + \frac{P_m + P_n}{P_m - P_n} \times T_{n \rightarrow m}) \quad (6)$$

以上分析揭示了状态转换与能量消耗之间的关系,为了更直观地了解,可如图 2 表示。根据图 2 及 T_m 的值,某模块只有当处于某一高能耗模式下的空转时间超过一定的限制时,则将该模块从这种高能耗模式转换为低能耗模式,以更好地节省节点能量。

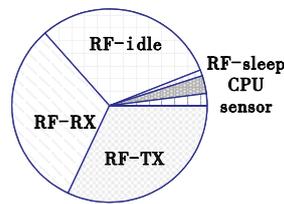


图1 感知节点各模块能耗比较

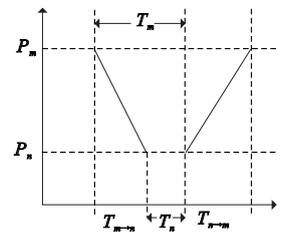


图2 状态转换与能量消耗之间的时间约束关系^[9]

2.3 节点整体及各模块状态转移分析

2.3.1 模块状态转移分析

1) RF 模块状态转移

RF 模块为了更好地支持休眠机制,大多支持多种工作模式,如飞思卡尔(Freescale)公司的 MC13213^[9] 系列 RF 模块和 Chipcon 公司的 CC2420^[10] 系列 RF 模块都支持六种工作状态:发送(TX)、接收(RX)、监听(CCA/ED)、空闲(idle)、睡眠(sleep)和关闭(off)。其各状态转换及驱动事件如图 3 所示。

off 状态为初始化通信能耗公式中的变量值,如各状态工作电压、电流、状态切换时间、状态切换能耗等,并预设各定时器时间值,注册统计变量。

idle 状态为缺省状态,根据不同事件进入相应的状态。例如有数据发送进入 TX 状态;有数据接收进入 RX 状态;超时进入 sleep 状态;检测信道进入 CCA/ED 状态。

TX 状态,即当有数据发送时进入 TX 状态,更新能耗数据,数据发送结束时回到 idle 状态。

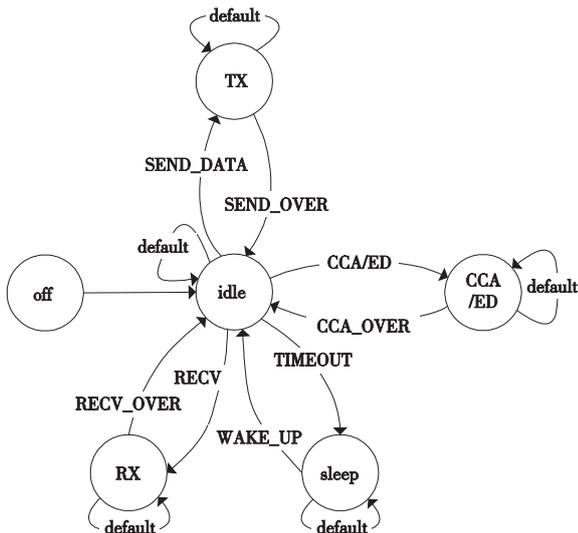


图3 RF模块的状态转换图

RX 状态,即当有数据接收时进入 RX 状态,更新能耗数据,数据接收结束时返回 idle 状态。

CCA/ED 状态,即当需要进入信道检测时进入此状态,更新能耗数据,信道检测完成后进入 idle 状态。

sleep 状态,即在 RF 模块空闲一定时间后进入此状态,此状态能耗极低,有数据发送、接收、信道检测等事件发生时状态被唤醒,再次进入 idle 状态。

2) CPU 模块状态转移

CPU 模块,以英特尔公司的 ARM 系列为代表的微处理器模块总共有三种状态,即运行状态(run)、空闲状态(idle)和睡眠状态(sleep)。相应驱动事件及其转换如图 4 所示。

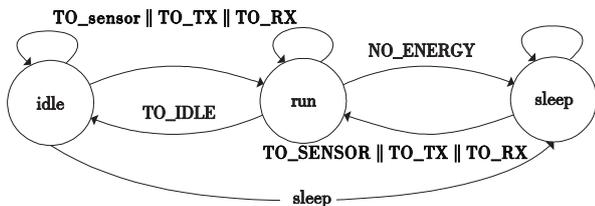


图4 CPU状态转移图

Idle 状态,即相当于 CPU 的空闲状态。当空闲超过定时器预设的时间后进入睡眠状态,若有感知、传输数据、发送数据等事件时进入 run 状态。

Run 状态,即当有感知、传输、发送等事件发生时,由 idle 或 sleep 进入此状态。若运行时间超过定时器预设的时间,回到 idle 状态;若能量耗尽或中断时,进入 sleep 状态。

Sleep 状态,即当空闲状态超过一定的时间或者运行状态下能量不足时进入此状态,此状态的能耗极低。若有事件发生则 sleep 状态被唤醒,重新进入 run 状态。

3) sensor 模块状态转移

Sensor 模块的进程模型如图 5 所示。

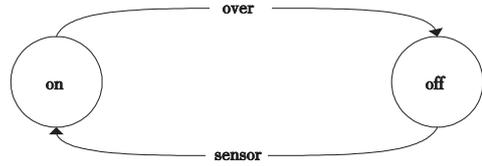


图5 Sensor的状态转移

定义 n 阶矩阵, $M = (a_{i,j})_{n \times n}, i, j \in \{0, 1, \dots, n\}$, 矩阵的行列表示模块或节点的所有状态。不同矩阵的元素代表不同的变量,包括各状态间的转换标志、持续时间、转换次数、转换功率等。

状态转换矩阵 (M_{conv}) 代表有 n 种状态的模块,若两个状态之间可以直接进行转换,则矩阵对应位置为 1; 否则该位置为 0。

状态转换时间矩阵 (M_{conv_time}) 用于统计相邻状态之间的转换时间,以秒(s)为单位,否则该位置标记为 0。

状态转换功率消耗矩阵 (M_{conv_power})。此矩阵的各元素用于表示相邻状态之间的转换功率,以 W 为单位。

状态转换次数矩阵 (M_{conv_fre})。该矩阵的元素代表各个状态之间的转换次数。在该矩阵的初始化过程中,本身状态之间的转换始终标记为 1,如睡眠(sleep)状态到睡眠(sleep)状态所对应的位置,其他位置均初始化为 0。

因此一个模块的能耗统计为

$$E = M_{conv} \times M_{conv_time} \times M_{conv_power} \times M_{conv_fre} \quad (7)$$

在式(7)中,当 $i=j$ 时,得到某个模块处于各状态下的能耗,当 $i \neq j$ 时,得到各个状态之间的转换能耗。

2.3.3 基于事件驱动节点整体状态转移分析

基于式(7),可建立 CPU、RF 模块、sensor 模块的能耗模型,其三个模型各自完全独立,但在实际应用中,三个模块之间存在关联。本节将基于事件驱动机制分析三个不同模型之间的联系,建立节点整体能耗模型^[11]。

引起各模块运行状态发生变化的事件有来自模型外部的触发事件和来自模型之间的触发事件。模型外部的触发事件有时钟周期、发送包、收发机接收包、收发机信道检测等事件;模型之间的触发事件有周期采集数据、发送包、接收包等事件。节点整体能耗模型如图 6 所示。

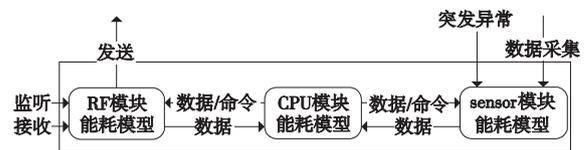


图6 基于事件触发的节点整体能耗模型

节点整体的事件触发机制如下:

a) sensor 模块的事件触发。时钟周期事件或突发异常触发 sensor 能耗模型进入 on 状态,工作完毕后回到 off 状态。

b) CPU 模块的事件触发。来自 sensor 模块能耗模型的数据采集事件、来自 sensor 模块能耗模型的突发异常事件,根据应用或协议需要发送包事件、来自 RF 模块的接收包事件触发 CPU 模块能耗模型。若此时 CPU 模块为 sleep 状态,则进入 idle 状态;若 CPU 模块已处在 idle 状态或 run 状态,则状态不发生改变。

c) RF 模块的事件触发。CPU 模块的发送包事件触发 RF 模块能耗模型,RF 模块由 idle 状态进入 TX 状态;收发机的接收包事件使 RF 模块由 idle 状态进入 RX 状态。收发机的信道

2.3.2 基于状态转移的矩阵建模

鉴于不同能耗模块具有不同的状态及状态转换关系,为了对不同能耗模块建立统一的模型,本文提出一种基于状态转移的矩阵建模方法来统计各模块不同状态之间的转换次数、持续时间、转换功率等,以此来统计节点与部件的能耗。

检测事件使 RF 模块由 idle 状态进入 CCA/ED 状态。

3 节点能耗模型性能分析

本文使用 OPNET 作为仿真工具,测试了两款 CPU 模块、两款 RF 模块和一款 sensor 模块的模块能耗以及各状态能耗。以其中的三个能耗模块构成感知节点,分析节点整体的能耗情况,验证本文节点能耗模型的准确性和可靠性。

3.1 节点各个模块的能耗仿真分析

本节测试了主流感知节点的 CPU 模块和 RF 模块:两款不同型号的处理器的 ARM^[12] 系列以及 MSP430f149^[13] 系列处理器;RF 模块使用飞思卡尔 (Freescale) 的 MC13213 和 Chipcon 公司推出的 CC2420 进行了仿真。Sensor 模块测试的是美国 Dallas 公司生产的一款集成数字温度传感器 DS18B20^[14]。下面分别对仿真结果进行分析。

在基于 OPNET 的仿真平台中,节点采用 AODV 路由协议,系统任务包括发送数据包和维护路由协议运行,无线通信范围为 200 m,仿真时间为 200 s,数据包发送间隔为

$$Y = \begin{cases} 1 & t \leq 50 \\ P(x=t) = \frac{\lambda^t}{t!} e^{-\lambda} & \lambda = 1; 50 < t \leq 130 \\ 1 & 130 < t \leq 200 \end{cases} \quad (8)$$

两款 CPU 的能耗情况如图 7、8 所示。

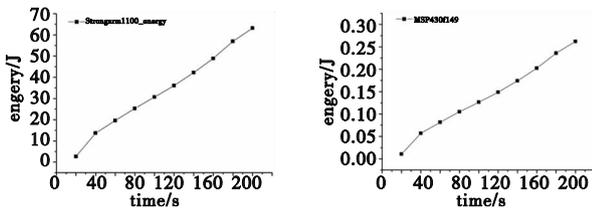


图7 ARM SA1100 处理器能耗 图8 MSP430f149处理器能耗

从图 7、8 的能耗曲线可以看出,两曲线随时间变化的趋势相似,曲线的趋势取决于处理器任务。处理器任务主要由源数据包发送、传感器感知、协议控制包发送三部分组成,其共同决定了曲线的趋势。尽管趋势相近,但在相同的任务下,能耗值相差悬殊,处理器 Strong ARM SA-1100 运行 200 s 的能耗为 65 J 左右,而处理器 MSP430f149 的能耗还不到 0.3 J。因此, MSP430 在处理性能满足要求的前提下具有显著的能耗优势。ARM 处理器各状态能耗情况如图 9 所示。

在本实验的负载背景下,处理器能耗随时间变化曲线的决定性因素为 run 状态的能耗, idle 状态的能耗相比之下要少得多, sleep 状态能耗最少,几乎可以忽略不计,状态转换所需能耗也非常小。在实际应用中,随着负载的不同,能耗曲线会有所不同,但总的趋势不会改变。由于处理器在 run 状态下功耗非常大,而 sleep 状态下功耗非常小,因此,提高休眠时间、降低运行状态处理器功耗是降低处理器能耗的有力手段。

RF 模块的能耗曲线如图 10 所示。

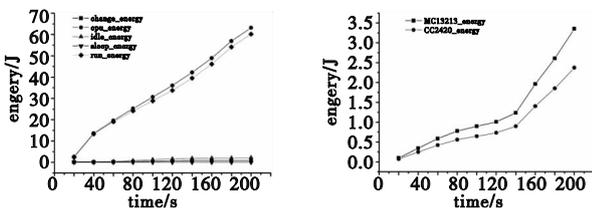


图9 ARM各运行状态的能耗

图10 RF模块的能耗

图 9、10 显示了这两种 RF 模块的能耗情况。在相同的负载条件下, MC13213 和 CC2420 的能耗曲线随时间变化趋势相类似,这是因为负载情况决定了曲线的趋势,而数据包的发送情况对负载情况的影响最大。而由于两者工作电流的差异性又导致了能量消耗的不一致, MC13213 的工作电流较大造成了其能耗比较大。

图 11 给出了编号为 CC2420 的 RF 模块的各状态能耗曲线图。由图 11 可知,在本实验的负载条件下, RF 模块消耗能量最多的状态为 RX 状态,其次为 TX 状态。RX 状态能耗最多,占总能耗一半以上,对曲线走势的影响最大,再次测试中,假定只要在通信范围内有包到达均会被无线模块接收,节点根据数据包判断是接收还是丢弃,因此 RF 模块接收数据包的数量要大于发送数据包的数量。

RF 模块在 idle 状态能耗、状态转换能耗、CCA/ED 状态能耗比较接近, sleep 状态能耗最少。因此,在满足无线感知网应用需求的情况下,减少通信流量、减少单跳通信距离、使用多跳短距离无线通信,使 RF 模块更多地处于 sleep 状态,将会减少 RF 模块的能耗。

对于 sensor 模块,本文采用的是一款周期性工作的温度传感器作为测试用例。其工作状态只有开启和关闭两种,传感器一次开启消耗的能量 $e_{off-on} = 0.0002$ J,一次关闭消耗的能量 $e_{on-off} = 0.0001$ J。实验中设定感知周期分别为 5 和 10 s 时的能耗如图 12 所示。由图 12 可知, sensor 模块的能耗曲线为一条直线,在感知周期分别为 5 和 10 s 的情况下,前者能耗是后者的两倍,这也说明了 sensor 模块能耗值与感知周期成反比,而不受到协议、数据包发送规律的影响。

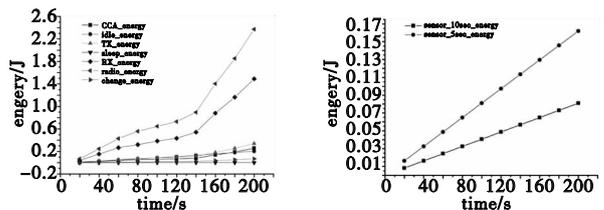


图11 CC2420各个工作状态的能耗

图12 Sensor模块的能耗

3.2 节点整体能耗仿真分析

由上所述可以统计出节点整体的能耗状况。假设一个节点处理器采用 MSP430f149, RF 模块采用 CC2420, 感知器为温度传感器 DS18B2, 节点周期为 10 s, 其整体能耗如图 13 所示。

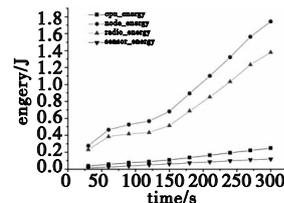


图13 节点整体能耗

由图 13 可知,在此应用任务下, sensor 模块能耗最低, CPU 模块能耗居中, RF 模块能耗最大, RF 模块的能耗对整个节点能耗起到了决定性作用,随着微处理器相关技术的不断提高,大多数情况下 RF 模块消耗能量较多。然而在某些特定的情况下(如图像处理等),大量的计算使处理模块消耗的能量与 RF 模块不相上下,此时可以采用动态电压调节以及动态能量管理实现来降低处理器能耗。

4 结束语

由于现有不同型号的 RF 模块和 CPU 模块所具有的状态数及状态转换模型不同,为了避免对这些不同型号的模块进行分别建模,本文采用基于状态转换的动态矩阵进行节点建模分析,用户可以根据无线感知网节点的实际参数对转移矩阵进行配置,从而方便该节点型号的能量统计。本文在设计通用性能耗模型的同时,还考虑了状态转换的能耗,提出了一种带时间界定的休眠机制。在 OPNET 仿真工具上,使用具体硬件的功耗参数进行仿真验证了本模型的正确性,同时也为 OPNET 上无线感知网络的仿真工作提供了一个更加准确的能量模型。本文研究成果可以为节点部件选型、协议设计评测以及网络构建分析提供理论指导和模型支撑。

本文模型未考虑节点供电模块(电池)的实际能量特性,尚未分析不同感知网应用对能耗模型的影响,上述工作有待进一步完善。同时,为优化模型,下一步工作将引入一些新的建模理论与工具对无线感知网系统进行建模,比如采用 AADL^[15],结合软硬件层面进行节点系统能量建模与仿真。根据不同的应用环境设计不同的信道模型以及网路业务流量模型,从而更加准确地评测无线感知网的能耗效率以及生存时间等相关参数。

参考文献:

- [1] BHATTI K, BELLEUDY C, AUGUIN M. Power management in real time embedded systems through online and adaptive interplay of DPM and DVFS policies[C]//Proc of IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 184-191.
- [2] JIN Jian-xun, WANG Hua-yong, WUN nian, *et al.* Energy efficient real-time DVS based on genetic algorithm[C]//Proc of International Conference on Embedded Software and Systems. Washington DC : IEEE Computer Society, 2008: 98-104.
- [3] 王淑华, 陈国定, 赵国炳. 一种无线传感器网络能耗模型及有效性分析[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(2): 215-217.
- [4] 杨余旺, 于继明, 赵炜, 等. 单跳无线传感器网络能量分析计算[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(1): 81-84.
- [5] 刘娅. 无线传感器网络能量模型及仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [6] 杨凤, 史浩山, 侯蓉晖, 等. 一种基于无线传感器网络数据链路层的能量模型[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9): 2070-2074.
- [7] 李彩云. 无线感知网节点能耗建模及系统能耗评测的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] 叶驰, 孙利民, 廖勇. 传感器网络的能量管理[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(8): 196-198.
- [9] WU Jin, PANG Qi-yong. Research and implementation of physical layer protocol basing on the single-chip ZigBee platform of MC13213 [C]//Proc of International Conference on Computer Application and System Modeling. 2010: 164-169.
- [10] HOWITT I, NETO R, WANG Jing, *et al.* Extended energy model for the low rate WPAN[C]//Proc of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. [S. l]: IEEE Press, 2005: 315-322.
- [11] 高妍. 无线传感器网络节点能耗建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] 续蕾. RISC 架构下的 ARM 微处理器应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2008, 4(29): 495-496.
- [13] 杨琦, 陈辉煌, 石江宏. 低功耗无线传感器网络终端节点设计[J]. 厦门大学学报. 2008, 47(3): 357-358.
- [14] 江太辉, 邓展威. DS18B20 数字式温度传感器的特性与应用[J]. 电子技术, 2003, 30(12): 46-49.
- [15] YANG Zhi-bin, PI Lei, HU Kai, *et al.* AADL: an architecture design and analysis language for complex embedded real-time systems [J]. Journal of Software, 2010, 21(5): 899-915.