

一种新的无线传感器节点的连续参数功耗模型

刘 伟 罗 嵘 杨华中
(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘 要: 为了估计传感器节点的能量开销, 需要对节点功耗进行合理、准确的建模。然而, 现有的节点功耗模型都没有很好地满足准确性这一要求。该文提出了一种新的基于连续参数功耗状态机的节点功耗模型, 可用于任意类型传感器节点的功耗建模。该模型能够根据电源电压和工作频率等参数的变化对节点功耗进行更为准确的预测。通过对传感器节点中常用的 ATmega128(L)微处理器进行实际建模并与独立的实测结果进行比较, 可以发现该模型对活动状态功耗的预测误差小于 1%, 对空闲状态功耗的预测误差小于 9.7%。该模型可用于替换传感器网络仿真工具的现有模型, 为传感器节点的能量开销提供更为准确的预测结果。

关键词: 无线传感器网络; 无线传感器节点; 功耗模型; 功耗状态机

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1968-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00725

A Novel Power Model with Continuous Parameters for Wireless Sensor Nodes

Liu Wei Luo Rong Yang Hua-zhong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to estimate energy overhead of sensor nodes, it is necessary to model their power consumption reasonably and accurately. However, existing power models are not accurate enough. This paper proposes a novel power model based on power state machines with continuous parameters, which can be used for any type of sensor nodes. This model is able to predict power consumption of sensor nodes according to changes of supply voltage and operating frequency. By handling ATmega128 (L) microprocessor frequently used in typical sensor nodes with this model and comparing with independent measurement results, it is shown that prediction error of this model is less than 1% for active state and 9.7% for idle state. This model can be used to substitute existing models of sensor network simulators to provide more accurate prediction results of energy overhead for sensor nodes.

Key words: Wireless sensor network; Wireless sensor node; Power model; Power state machine

1 引言

由于无线传感器节点通常是由能量有限的电池供电的, 因此为了使无线传感器网络满足典型应用的部署时间要求, 必须大幅度降低节点的平均功耗。现有的技术手段可以归结为两类: 一类是设计低功耗的节点硬件结构, 另一类是使用功耗管理机制和设计低能耗的网络协议^[1,2]。这些技术可以显著降低节点的平均功耗, 从而延长网络的运行时间。然而, 即使使用了低功耗的节点硬件和低能耗的网络协议, 仍然需要对节点的生存时间进行评估, 从而对调整系统参数、确定维护周期等工作进行指导。由于无线传感器网络的规模通常很大, 通过对少量节点组成的小规模网络进行实际测试来评估节点的运行时间往往并不准确, 而且也较为困难。因此, 有

必要对节点在目标网络规模下的能量开销和生存时间进行仿真。

为了估计节点的能量开销, 需要对节点功耗进行合理、准确的建模, 从而使仿真结果能较为真实地反映节点的实际能量开销。然而, 现有的节点功耗模型都没有很好地满足准确性这一要求。为此, 本文提出了一种基于连续参数功耗状态机的节点功耗模型, 可用于任意类型传感器节点的功耗建模。这一模型能够根据电源电压和工作频率等参数的变化对节点功耗进行更为准确的预测。通过对传感器节点中常用的 ATmega128(L)微处理器^[3]进行实际建模并与独立的实测结果进行比较, 可以发现该模型对活动状态功耗的预测误差小于 1%, 对空闲状态功耗的预测误差小于 9.7%。该模型可用于替换传感器网络仿真工具的现有模型, 为传感器节点的能量开销提供更为准确的预测结果。

本文剩余内容的结构组织如下: 第 2 节介绍了与传感器节点功耗模型有关的研究工作。第 3 节讨

2009-05-12 收到, 2010-04-27 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z224)资助课题

通信作者: 罗嵘 luorong@tsinghua.edu.cn

论了基于功耗状态机的节点功耗模型,并将电源电压和工作频率两种参数引入到功耗状态机中,提出了连续参数的节点功耗模型。第 4 节通过对传感器节点中常用的 ATmega128(L)微处理器进行实际建模并与独立的实测结果进行比较,来说明该模型的预测效果。第 5 节给出了本文的结论。

2 研究现状

网络仿真是无线传感器网络领域的一个研究热点,目前已经出现了多种仿真工具,比如 Tossim^[4], ATEMU^[5], Avrora^[6]等等。这些仿真工具对节点硬件做了不同程度的抽象,利用节点实际运行的代码来仿真节点的工作情况。同时,通过建立网络拓扑模型和无线信道模型等,对网络中多个节点之间的相互影响进行建模,从而对网络性能进行分析。这些仿真工具在预测精度和时间开销等方面有着明显的差异,能够满足不同的网络仿真需求。

在传感器网络的能量开销仿真方面,已经出现了包括 PowerTossim^[7]和 AEON^[8]在内的多种仿真工具。这些仿真工具使用不同的方式来估计能量开销。有些工具,比如 PowerTossim,通过统计特定事件发生的次数来近似表示节点的能量开销,比如节点发送/接收数据包的个数,因此其结果只能反映节点的相对能量开销,无法给出具体的开销值。有些工具使用了针对特定节点的实测功耗模型,比如 AEON,因此能够给出节点能量开销的估计值。然而,这些功耗模型受到特定的测量条件的限制,无法反映节点实际功耗随电源电压、工作频率等参数的变化情况,因此其预测结果往往存在较大的误差。

AEON 基于 Benini 等人提出的功耗状态机(power state machine)的概念^[9]。功耗状态机在有限状态机的基础上,引入了状态功耗和状态转移开销。状态转移开销包括状态转移所需的时间和状态转移期间的平均功耗。每一个模块的功耗状态机结合起来就构成整个系统的功耗状态机。这样,根据系统状态的时序变化,就可以估计出系统的能量开销。然而,在文献[9]给出的功耗状态机中,各模块在给定状态下的功耗是固定的,没有考虑到电源电压、工作频率等因素的影响。AEON 只是将其用于自己的功耗模型中,并没有针对实际的平台特性进行改进。这种固定的状态功耗对于实际的传感器节点而言是不合理的,因为模块功耗会随电源电压等参数的改变而发生较大的变化。

文献[10, 11]提出在节点中实现功耗模型,以提供在线估计能量开销的功能。它采用的功耗模型与 AEON 相同,只是为了降低节点的计算和存储开销

做了适当的简化。文献[12, 13]给出的节点功耗模型同样基于功耗状态机的概念。与 AEON 相同,这些模型依然采用固定的状态功耗,因此也无法反映节点实际功耗随电源电压、工作频率等参数的变化情况。

3 连续参数的节点功耗模型

3.1 基于功耗状态机的节点功耗模型

无线传感器节点所用的微处理器和射频单元通常具有多种工作状态,以便在需要时能够以较低的功耗运行,从而降低节点的平均功耗。如果每种工作状态都有一个稳定的功耗值,那么一个硬件模块就会有多个离散的功耗状态。设某个模块有 M 种不同的工作状态 S_1, S_2, \dots, S_M , 其中 S_1 为初始状态,那么其功耗状态机如图 1(a)所示。

图 1(a)中表示状态的圆圈内给出了状态的名称 S_i 以及该状态下的平均功耗 P_i , 状态间的有向连线上给出了从状态 S_i 转换到 S_j 所需的时间 TT_{ij} 和状态转换期间的平均功耗 TP_{ij} 。如果在一段时间内模块状态转换的时序已知,那么就可以确定任一时刻的功耗,从而能够估计出这段时间内的能量开销。假设节点由 N 个不同的功能模块 C_1, C_2, \dots, C_N 组成,这些模块分别有 M_i 个功耗状态,那么节点的功耗状态数为

$$K = \prod_{i=1}^N M_i \quad (1)$$

当然,在实际中某些状态组合可能并不存在,比如射频单元通常不会在微处理器进入睡眠状态后仍处于发送(或接收)状态。式(1)表明,节点的功耗状态是组成模块的功耗状态的组合。因此,如果确定了功能模块的划分和各功能模块的功耗状态机,就可以建立起节点的功耗模型。节点在某一时刻的功耗取决于节点各功能模块的状态,其取值是各功能模块当前状态下的功耗之和。

3.2 连续参数的功耗状态机

3.1 节介绍的节点功耗模型中,对于每一种状态,使用固定功耗作为其状态功耗。然而,对于传感器节点常用的功能模块而言,由于节点电池所提供的电压会发生变化,同时电流也会随着电压的变化而改变,因此其在特定状态下的功耗并不是恒定的。另外,对于节点常用的微处理器和射频单元而言,工作频率的不同也会对实际功耗产生较大的影响。因此,使用恒定的数值来表示模块的状态功耗并不准确,从而无法对节点功耗做出正确的估计。

基于上述考虑,为了更准确地估计节点功耗,本文引入了连续参数的功耗状态机。也就是说,状

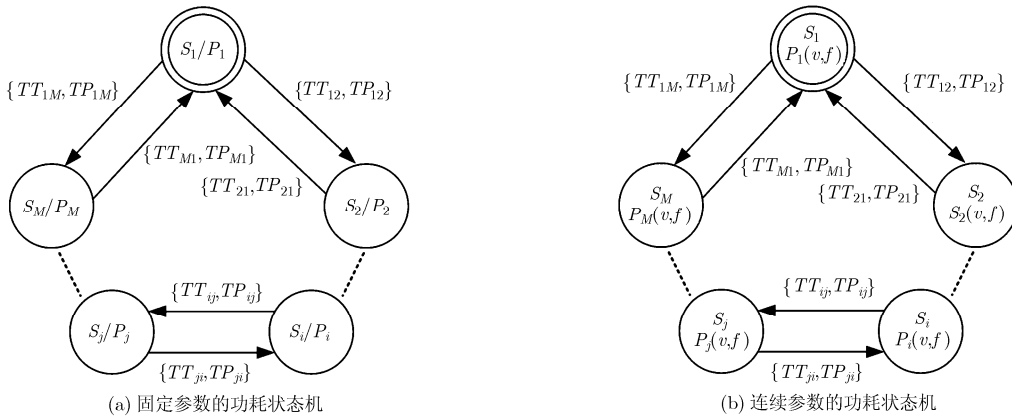


图 1 基于功耗状态机的节点功耗模型

态功耗不能采用恒定的数值，而应采用式(2)所示的函数来表示。

$$P_i = F(v, f) \tag{2}$$

其中 v 表示模块的电压， f 表示模块的工作频率。使用这种连续参数的功耗状态机，如图 1(b)所示，就可以根据电源电压和工作频率的变化调整模块的状态功耗，从而得到更为准确的节点功耗。另外，对于状态转换期间的功耗而言，其取值实际上也不是恒定的。如果状态转换所需的时间很短，可以使用恒定值作为转移功耗，此时引入的误差可以忽略不计。如果状态转换所需的时间比较长，就需要根据式(2)进行建模了。

因此，对于基于连续参数功耗状态机的节点功耗模型而言，最重要的工作是确定模块在不同工作状态下的功耗与电源电压和工作频率的关系。在这种情况下，可以按照以下步骤建立节点的功耗模型：

(1)确定节点的功能模块：节点最主要的功能模块为微处理器、射频单元、存储器件和传感器芯片。为了降低模型的复杂度，能量消耗相对很小的硬件可以忽略；

(2)确定这些模块的工作状态，如微处理器的活动状态和各种不同的睡眠状态，传感器芯片的开和关状态，射频单元的发送状态、接收状态和监听状态等；

(3)确定模块在不同工作状态下的功耗与电源电压、工作频率的函数关系；

(4)确定模块不同工作状态之间的转移时间和转移功耗；

(5)将功能模块的工作状态组合成节点的工作状态，从而得到节点的功耗模型。

4 模型预测效果的评估

为了说明本文提出的功耗模型的预测效果，本节使用该模型对传感器节点中常用的

ATmega128(L)微处理器进行实际建模，并将预测结果与独立的实测结果进行比较。

4.1 功耗状态与转移时间

首先需要确定 ATmega128(L)微处理器的工作状态。ATmega128(L)具有 7 种不同的工作状态，分别为活动状态、空闲状态、ADC 减噪状态、低电状态、省电状态、待机状态和扩展待机状态。除了活动状态以外，其它几种工作状态均不执行代码，属于 ATmega128(L)的低功耗状态。然后需要确定不同工作状态之间的转移开销。ATmega128(L)从活动状态转移到任何一种睡眠状态几乎没有延时，因此转移功耗可以忽略不计。另外，睡眠状态之间无法直接进行转移，因此只需要确定从各种睡眠状态进入活动状态的转移开销即可。这些开销如表 1 所示，其中转移时间的单位为时钟周期。从表 1 可以看出，从某些睡眠状态进入活动状态的转移时间很长，因此需要考虑电源电压和工作频率对转移功耗的影响。由于睡眠状态的功耗与活动状态的功耗相比可以忽略不计，因此可以使用活动状态功耗的一半来近似表示转移功耗。这样，转移功耗和活动状态功耗可以使用相同的功耗与电源电压、工作频率的函数关系。

表1 睡眠状态到活动状态的转移开销

睡眠状态	转移时间	转移功耗
空闲/ADC 减噪状态	0	0
低电/省电状态	1000	$P_{\text{active}}/2$
待机/扩展待机状态	6	$P_{\text{active}}/2$

4.2 ATmega128(L)的连续参数功耗模型

ATmega128(L)微处理器在 ADC 减噪状态、低电状态、省电状态、待机状态和扩展待机状态下的功耗非常低，即使电源电压和工作频率发生较大变化，其功耗的改变相对于活动状态和空闲状态下的

功耗而言也可以忽略不计。因此，本文只考虑活动状态和空闲状态下的功耗随电源电压和工作频率变化的关系。对于 ADC 减噪状态、低电状态、省电状态、待机状态和扩展待机状态，仍然使用固定值表示其状态功耗。

在活动状态和空闲状态下，ATmega128(L)微处理器的电流会随着电源电压和工作频率的改变而发生较大的变化，因此只要确定电流随电源电压和工作频率的变化关系，就能确定活动状态和空闲状态下的功耗函数。图 2(a)和图 2(b)分别给出了活动状态下电流随工作频率的变化曲线以及电流随电源电压的变化曲线。同样，图 2(c)和图 2(d)分别给出了空闲状态下电流随工作频率的变化曲线以及电流随电源电压的变化曲线。

由于节点通常由两节串联的 AA 电池驱动，因此电源电压最高不会超过 3.5 V。从图 2(a)和图 2(c)可以看出，在此电压限制下，当工作频率在 1 MHz 以上时，活动模式和空闲模式的电流-工作频率关系近似为直线。由于节点的射频单元在电源电压较低的情况下无法正常工作，因此即使 ATmega128(L)可以工作在更低的电压下，节点实际上已经失效了。为此，本文只考虑 2.1 V~3.5 V 这段区间。从图 2(b)和图 2(d)可以看出，这段区间内的曲线曲率很低，也可以用直线进行逼近。

基于上述考虑，可以使用式(3)和式(4)来拟合活动状态和空闲状态下的电流变化曲线：

$$I_{CC} = f_1(V_{CC}) \cdot \text{Freq} + f_0(V_{CC}) \quad (3)$$

$$I_{CC} = g_1(\text{Freq}) \cdot V_{CC} + g_0(\text{Freq}) \quad (4)$$

其中 V_{CC} 表示电源电压，Freq 表示工作频率。函数 f_1 和 f_0 与工作频率无关，而函数 g_1 和 g_0 与电源电压无关。函数 f_1 和 f_0 ， g_1 和 g_0 分别为电源电压和工作频率的一次函数，因此有

$$I_{CC}(V_{CC}, \text{Freq}) = a_1 V_{CC} \text{Freq} + a_2 V_{CC} + a_3 \text{Freq} + a_4 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} f_1(V_{CC}) &= a_1 V_{CC} + a_3, & f_0(V_{CC}) &= a_2 V_{CC} + a_4 \\ g_1(\text{Freq}) &= a_1 \text{Freq} + a_2, & g_0(\text{Freq}) &= a_3 \text{Freq} + a_4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

为了确定上述公式中的系数，对 ATmega128(L)在活动状态和空闲状态下的工作电流进行了实际测量，测量数据如表 2 和表 3 所示。

由式(3)和式(6)可以得到

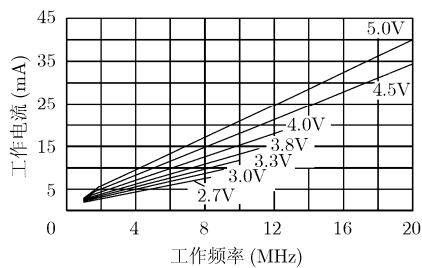
$$a_1 V_{CC} + a_3 = f_1(V_{CC}) = \frac{I_{CC2} - I_{CC1}}{\text{Freq}_2 - \text{Freq}_1} \quad (7)$$

$$a_2 V_{CC} + a_4 = f_0(V_{CC}) = I_{CC} - f_1(V_{CC}) \text{Freq} \quad (8)$$

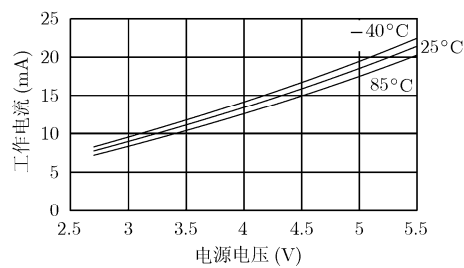
其中 I_{CC1} 和 I_{CC2} 分别为相同电源电压下对应不同工作频率 Freq_1 和 Freq_2 的工作电流。根据式(7)和式

表 2 活动状态下的电流测试数据

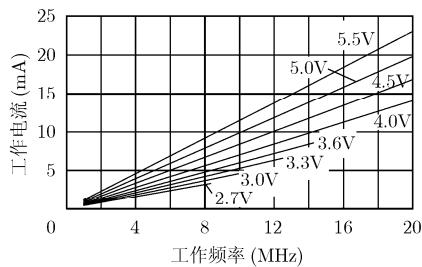
工作频率	电源电压(V)	工作电流(mA)
4 MHz	2.3	3.832
	2.5	4.260
	2.7	4.691
	3.0	5.302
	3.3	5.973
8 MHz	2.3	6.213
	2.5	6.964
	2.7	7.732
	3.0	8.928
	3.3	10.357



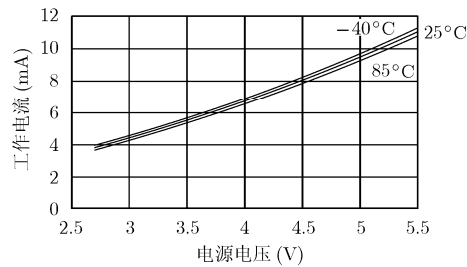
(a) 活动状态：电流与工作频率的关系



(b) 活动状态：电流与电源电压的关系



(c) 空闲状态：电流与工作频率的关系



(d) 空闲状态：电流与电源电压的关系

图 2 活动状态和空闲状态的电流变化曲线^[3]

表 3 空闲状态下的电流测试数据

工作频率	电源电压(V)	工作电流(mA)
4 MHz	2.3	1.587
	2.5	1.808
	2.7	2.033
	3.0	2.332
	3.3	2.608
8 MHz	2.3	2.969
	2.5	3.391
	2.7	3.817
	3.0	4.435
	3.3	5.043

(8), 在 $V_{CC1}=2.3V$, $V_{CC2}=2.5V$, $V_{CC3}=2.7V$, $V_{CC4}=3.0V$ 和 $V_{CC5}=3.3V$ 下, 作最小二乘线性拟合可以得到 a_1 , a_2 , a_3 和 a_4 的估计值, 如表 4 所示。

表 4 函数参数的拟合结果

拟合参数	活动模式	空闲模式
a_1	$4.97e-10$	$2.63e-10$
a_2	$1.0e-4$	$-3.09e-5$
a_3	$-5.65e-10$	$-2.62e-10$
a_4	$1.2e-3$	$3.01e-4$

因此, ATmega128(L)微处理器在活动状态和空闲状态下的功耗模型分别为

$$P_{\text{active}}(V_{CC}, \text{Freq}) = 4.97 \times 10^{-10} \times V_{CC}^2 \text{Freq} + 10^{-4} \times V_{CC}^2 - 5.65 \times 10^{-10} \times \text{Freq} V_{CC} + 1.2 \times 10^{-3} \times V_{CC} \quad (11)$$

$$P_{\text{idle}}(V_{CC}, \text{Freq}) = 2.63 \times 10^{-10} \times V_{CC}^2 \text{Freq} - 3.09 \times 10^{-5} \times V_{CC}^2 - 2.62 \times 10^{-10} \times \text{Freq} V_{CC} + 3.01 \times 10^{-4} \times V_{CC} \quad (12)$$

4.3 针对 MicaZ 节点的实际功耗模型

MicaZ 是一款典型的传感器节点, 采用了 ATmega128(L) 微处理器^[4]。为了与独立的实测结果进行比较, 这里给出针对该节点的实际功耗模型。考虑到 MicaZ 节点的工作频率为 7.37 MHz, 同时考虑实际的电源电压区间 2.1 V–3.3 V, 可以得到 MicaZ 节点的微处理器功耗模型:

$$P_{\text{active}}(V_{CC}) = 3.76 \times 10^{-3} \times V_{CC}^2 - 2.96 \times 10^{-3} \times V_{CC} \quad (13)$$

$$P_{\text{idle}}(V_{CC}) = 1.91 \times 10^{-3} \times V_{CC}^2 - 1.63 \times 10^{-3} \times V_{CC} \quad (14)$$

图 3 给出了活动状态和空闲状态下功耗随电源电压的变化曲线。根据拟合结果, 当 $V_{CC}=3.1V$ 时, 活动状态和空闲状态下的功耗分别为 26.96 mW 和 13.20 mW。文献[15]给出的相同电源电压下的活动

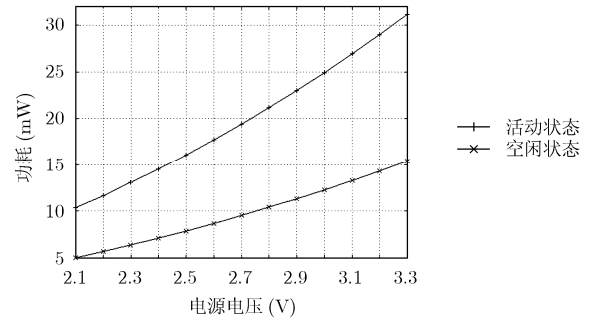


图 3 MicaZ 节点的微处理器功耗模型

状态功耗为 26.82 mW 和 27.06 mW(对应不同的指令类型), 空闲状态功耗为 12.03 mW。与其相比, 活动状态功耗的预测误差小于 1%, 空闲状态功耗的预测误差小于 9.7%。从图 3 可以清楚地看到, 微处理器的功耗随着电源电压的变化会发生很大的改变, 因此以固定测量值作为微处理器的状态功耗无法准确反映出节点的实际能量开销。引入连续参数的节点功耗模型可以更有效地对节点功耗进行预测。本文用式(13)和式(14)给出的模型替换了 Avrora 仿真工具的现有模型, 以便为传感器节点的能量开销提供更为准确的预测结果。需要特别说明的是, 式(11)–式(14)中各变量之间纯属数值关系。

5 结论

为了估计传感器节点的能量开销, 需要对节点功耗进行合理、准确的建模。然而, 现有的节点功耗模型都没有很好地满足准确性这一要求。本文提出了一种基于连续参数功耗状态机的节点功耗模型, 可用于任意类型传感器节点的功耗建模。该模型能够根据电源电压和工作频率等参数的变化对节点功耗进行更为准确地预测。通过对传感器节点中常用的 ATmega128(L)微处理器进行实际建模并与独立的实测结果进行比较, 可以发现该模型对活动状态功耗的预测误差小于 1%, 对空闲状态功耗的预测误差小于 9.7%。该模型可用于替换传感器网络仿真工具的现有模型, 为传感器节点的能量开销提供更为准确的预测结果。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su Wei-lian, Sankarasurbramanian Y, and Cayirci E. A survey on sensor network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102–114.
- [2] 马震, 刘云, 沈波. 一种无线传感器网络的能耗平衡覆盖模型[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(9): 2250–2253.
Ma Zhen, Liu Yun, and Shen Bo. An energy balanced coverage model for wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(9):

- 2250-2253.
- [3] Atmel Corp. Atmega128(L) datasheet. <http://www.atmel.com>, 2009.
- [4] Levis P, Lee N, and Welsh M, *et al.* TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications[C]. The 1st Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, California, USA, 2003: 126-137.
- [5] Polley J, Blazakis D, and Mcgee J, *et al.* ATEMU: A fine-grained sensor network simulator[C]. The 1st IEEE Conf. Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, Santa Clara, California, USA, 2004: 145-152.
- [6] Titzer B L, Lee D K, and Palsberg J. Avrora: scalable sensor network simulation with precise timing[C]. The 4th Int'l Symp. Information Processing in Sensor Networks, Los Angeles, California, USA, 2005: 477-482.
- [7] Shnayder V, Hempstead M, and Chen B, *et al.* Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications[C]. The 2nd Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, Maryland, USA, 2004: 188-200.
- [8] Landsiedel O, Wehrle K, and Gotz S. Accurate prediction of power consumption in sensor networks[C]. The 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, Sydney, Australia, May 30-31, 2005: 37-44.
- [9] Benini L, Bogliolo A, and D E Micheli G. Survey of design techniques for system-level dynamic power management[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2000, 8(3): 299-316.
- [10] Dunkels A, Osterlind F, Tsiftes N, and He Z. Software-based on-line energy estimation for sensor nodes[C]. The 4th workshop on Embedded networked sensors. New York, NY, USA, 2007: 28-32.
- [11] Dunkels A, Osterlind F, Tsiftes N, and He Z. Software-based sensor node energy estimation[C]. The 5th Int'l Conf. Embedded networked sensor systems. Sydney, Australia, 2007: 409-410.
- [12] Kellner S, Pink M, Meier D, and Blass E O. Towards a realistic energy model for wireless sensor networks[C]. The 5th Annual Conf. Wireless On demand Network Systems and Services, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2008: 97-100.
- [13] Schmidt D, Kramer M, Kuhn T, and Wehn N. Energy modelling in sensor networks[J]. *Advances in Radio Science*, 2007, 5: 347-351.
- [14] Crossbow Corp. MicaZ datasheet. <http://www.xbow.com>, 2009.
- [15] Kramer M and Gerald A. Energy measurements for MicaZ node. Technical Report, 2006. <http://vs.informatik.uni-kl.de/publications/2006/KrGe06/>.
- 刘 伟: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为低功耗无线传感器网络设计技术。
- 罗 嵘: 女, 1970 年生, 副教授, 研究方向为 VLSI 设计技术、嵌入式系统设计等。
- 杨华中: 男, 1967 年生, 教授, 研究方向为微系统芯片的新结构、面向通信和媒体处理的芯片设计、微系统芯片的综合与验证和模拟及混合信号系统设计等。