

无线传感器节点能量自主预测算法研究

杜永文,冯 珂,练云翔

(兰州交通大学 电子与信息工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 结合节点能耗模型,提出了传感器节点能量自主预测算法. 算法考虑了不同工作状态对能耗的影响以及电池放电对传感器节点的影响. 在 TinyOS 平台上实现了算法和仿真,同时在硬件上进行了实测,并对得到的仿真数据和实测数据进行分析. 实验数据表明算法能比较准确地预测节点的工作时间和剩余能量. 为能量感知算法提供准确的能量依据,提高节点能量使用效率和网络生命期.

关键词: 无线传感器网络;能耗算法;能耗模型;TinyOS

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)12—0113—04

Research on Self-prediction Algorithm of Residual Energy for WSN

DU Yong-wen, FENG Ke, LIAN Yun-xiang

(School of Electronics & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A self-estimation algorithm of residual energy is proposed, according to discharging process of battery and energy consumption model. The algorithm is improved to take into consideration the influence of different working conditions and the discharging time of battery. It is implemented and simulated on TinyOS, and also tested on real node device. Comparing the simulation data and measured data, the result indicates that the algorithm can more precisely predict work time and residual energy. For energy aware algorithm provide accurate energy basis, and improve the energy efficiency and life.

Key words: WSN; energy consumption algorithm; energy consumption model; TinyOS

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是将传感器、无线通信等多种技术交叉应用的网络系统. 随着网络工作时间的延长,一些节点会因为能量耗尽停止工作,影响网络的可靠性,因此预测工作时间和剩余能量成为其重要的研究内容^[1]. 文献[2]从单跳和多跳两种传输模式入手,通过数学建模分析网络拓扑结构与网络能量,进行剩余能量的估算. 文献[3]中,使用离散事件系统(DES)框架中的优化原理建立数学模型,得到了能量消耗的目标函数. 文献[4]结合节点剩余能量和数据有效传输距离定义了能耗的评价指标.

现有的能耗算法在计算能量消耗时,并没有考虑电源的实际放电情况^[5].

本文在现有能耗模型的基础上,进一步研究了在传感器网络能量有限的前提下如何确定节点剩余能量,给出了传感器网络中集剩余能量估算、工作时间预测为一体的一种能量自主预测算法. 根据节点工作状态的不同,将节点芯片的物理特性因素和能量消耗因素有效地结合起来,使用能耗模型计算节点消耗,分析能耗分布情况,计算节点剩余能量;针对大多传感器节点采用电池供电的情况,采用节点的电池放电过程进行时间的预测,通过 TinyOS 平台进行实现,并和实际测量结果进行比对.

2 传感器节点能耗模型

节点具有多种工作模式,对应不同的能耗级别.随着集成电路工艺发展,节点工作能耗集中在通信能耗和采集能耗^[6].根据通信状态的不同可以将通信分为四种状态^[7]:传输状态、接收状态、空闲监听状态、休眠状态.每种状态的工作时间、功率消耗是不同的.节点通信各状态的能耗分布情况因节点型号不同而不同,但是现有能耗模型都将休眠能耗忽略^[8].当传感器节点长时间处于休眠状态时,能量消耗会进行累加,影响剩余时间准确性,因此并不能将休眠状态忽略.

定义节点的累积能耗 $E(t)$ 为时间的函数,其中 $E_{\text{rf}}(t)$ 为 t 时间通信消耗的能量, $E_{\text{sensor}}(t)$ 为 t 时间采集能耗,则能耗公式为^[7]

$$E(t) = E_{\text{rf}}(t) + E_{\text{sensor}}(t) \quad (1)$$

定义射频模块(RF)的通信能量为 E_{rf} ,发送能量为 E_{send} ,接收能量为 E_{receive} ,空闲监听能量为 E_{idle} ,睡眠能量为 E_{sleep} ,则有:

$$E_{\text{rf}} = E_{\text{send}} + E_{\text{receive}} + E_{\text{idle}} + E_{\text{sleep}} \quad (2)$$

以传感器节点发送状态为例,发送能量计算公式为

$$E_{\text{send}} = P_{\text{send}} \times \sum_{i=0}^n (T_{i_{\text{send}}} \times N_{i_{\text{send}}}) \quad (3)$$

P_{send} 为发送状态的功率,可根据厂家提供的数据手册中节点物理特性参数(工作电压、电流值)计算得出; $T_{i_{\text{send}}}$ 为第 i 各发送状态花费的时间,它可通过程序中的计时器计算得出, $N_{i_{\text{send}}}$ 为第 i 各发送状态发送的次数,它可通过程序中的计数器取得.同理可以得出接收、空闲、休眠、采样的能量公式.

$$E_{\text{rec}} = P_{\text{rec}} \times \sum_{i=0}^n (T_{i_{\text{rec}}} \times N_{i_{\text{rec}}}) \quad (4)$$

$$E_{\text{idle}} = P_{\text{idle}} \times \sum_{i=0}^n T_{i_{\text{idle}}} \quad (5)$$

$$E_{\text{sleep}} = P_{\text{sleep}} \times \sum_{i=0}^n T_{i_{\text{sleep}}} \quad (6)$$

$$E_{\text{sensor}} = P_{\text{sensor}} \times \sum_{i=0}^n (T_{i_{\text{sensor}}} \times N_{i_{\text{sensor}}}) \quad (7)$$

3 自主预测算法

自主预测算法可以展示传感器节点的能耗分布情况,结合电池放电时间算法,根据当前能耗消耗情况就能估算出节点的可用时间和剩余时间.

3.1 电池放电时间算法

传感器节点大多采用的是电池供电,工作寿命

受电池能量限制,更换电源在大多数部署环境中几乎是不可能的,因此通过电池的使用寿命公式直观地显示传感器节点的剩余时间,有助于对传感器网络的掌控,从而详细了解传感器网络的工作情况.根据电池的放电过程可知:

$$T = \frac{Q \times \eta \times (1 + \alpha(t - 25))}{K_1 I} \quad (8)$$

式中, T 为放电小时数(h); η 为放电容量系数; α 为电池温度系数($1/^{\circ}\text{C}$),当放电小时率 ≥ 10 时, $\alpha = 0.006$,当 $1 \leq$ 放电小时率 < 10 时, $\alpha = 0.008$,当放电小时率 ≤ 1 时, $\alpha = 0.01$; t 为实际电池所在地环境最低温度的数值; Q 为电池的容量(mAh); I 为负载电流(mA); K_1 为安全系数,取 1.25.

式(8)只是对电池进行测试后得出的一个较为保守的计算电池放电时间的估算公式.

3.2 影响放电时间的因素与改进

考虑到电池放电时间计算公式的不准确性,在计算节点放电时间时,以蓄电池厂商提供的标准荷电状态 100% 放电数据为准,同时结合以下因素并提出改进方法.

(1) 负载电流的不稳定

在无线传感器网络传感器节点工作时,电流无法恒定,随着传感器节点工作状态的改变而改变.因此节点的电流大小要根据建立的能耗模型进行分类计算.

(2) 厂商提供的放电数据的准确性

有时厂商为了推广产品,在提供的数据中,对芯片的能耗估计是保守的,对电池的放电能力进行了一定程度的夸大,而且由于制作厂家的工艺不同,制造出来的元件有些细微的差别.考虑芯片制造工艺,结合实验测量与厂家提供的数据进行验证,引入影响系数 K_2 为 0.98.

(3) 电池老化

随着电池使用时间的增长,电池会发生老化问题,电池的容量会随着时间的增加而减少.考虑电池在工作年限内老化的问题,引入老化系数 K_3 .使用同种不同时间段的电池进行放电实验,根据电池的放电数据和生产时间进行老化系数的确定,本次实验选用电池的老化系数 K_3 为 0.99.

(4) 放电容量

无线传感器节点电池使用的数据是厂商提供的标准荷电状态即 100% 放电时的数据,但是节点实际工作电压为 2~3.8 V.在稳压模块作用下,当电池电压低于稳压模块支持的下限电压时便不再工作.而且电池在放电末期,电压下降会越来越快.实

际测试时使用 3.7 V 锂电池,当节点停止工作时,电池中仍有少量的剩余电量.结合电池放电曲线,经过多次实验验证,当电池电压小于最小工作电压时,放电容量系数 η 为 0.95.

3.3 预测算法

由建立的能耗模型和电池放电过程可以得出预

$$I = \frac{\sum_{i=0}^n T_{i_{\text{send}}} \times I_{\text{send}} + \sum_{i=0}^n T_{i_{\text{rec}}} \times I_{\text{rec}} + \sum_{i=0}^n T_{i_{\text{idle}}} \times I_{\text{idle}} + \sum_{i=0}^n T_{i_{\text{sleep}}} \times I_{\text{sleep}} + \sum_{i=0}^n T_{i_{\text{sensor}}} \times I_{\text{sensor}}}{T_1}$$

(10)

$$T = \frac{Q \times \eta \times (1 + \alpha(t - 25)) \times K_2 \times K_3}{K_1 I}$$

(11)

$$T_{\text{remainder}} = T - T_1$$

(12)

式中, T_1 为传感器节点已经使用的时间; I 为传感器节点平均电流; T 为根据目前工作状况得出的传感器节点可以工作的总时间; $T_{\text{remainder}}$ 为传感器节点的剩余工作时间.

3.4 自主预测算法的工作步骤

- (1)查找使用的传感器节点的数据手册,获取不同状态的规格参数;
- (2)对电池的容量进行测试,记录放电过程中电源电压的变化数据,根据芯片工作电压范围计算出电池的放电容量系数;
- (3)传感器节点通过定时器计算不同工作状态下的工作时间,程序根据工作状态情况动态调用能耗模型,根据建立的能耗模型计算各状态消耗的能量,根据电池容量等参数使用式(11)计算出传感器节点的生命周期,根据已工作的时间计算出剩余时间;
- (4)传感器节点将工作时间、工作能耗,以及电池的剩余时间,通过无线通信传输,并不断重复该操作直到传感器节点停止工作.

4 算法仿真实验

为了测试本文无线传感器能量算法的整体性能和有效性,利用 TinyOS 仿真软件进行仿真实验. TinyOS 是专门为无线传感器网络设计的操作系统,能够快速实现基于 ZigBee 的程序设计,实现对代码的仿真,适合对无线传感器网络的仿真与优化^[9].

4.1 相关参数和测量设备

本次实验的传感器节点采用的是 CC2530 芯片的 ZigBee 节点,仿真时相关的数据参数可以查询 CC2530 的数据手册.实验时,传感器节点相关电路

测公式:

$$T_1 = \sum_{i=0}^n (T_{i_{\text{send}}} + T_{i_{\text{rec}}} + T_{i_{\text{idle}}} + T_{i_{\text{sleep}}})$$

(9)

信息采用 PF9802 交直流电参数测量仪进行采集.由于传感器节点在休眠状态时,电流较小只有几微安,需要使用微安表进行测量^[10].

4.2 通信能耗实验

无线传感器节点在不同通信状态能耗不同,从图 1 中可知在通信周期内不同工作状态的电流情况,以及 TinyOS 仿真和实际测量不同工作状态的电流变化情况结果.节点在通信状态下的能量消耗变化趋势如图 2 所示.图 1 和图 2 中仿真与实测的数据结果大致相同,只有微小的差别,这充分证明了数据的正确性.

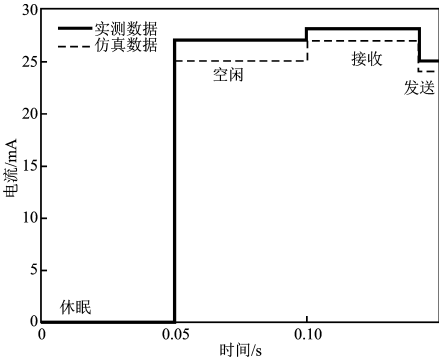


图 1 通信状态电流对比

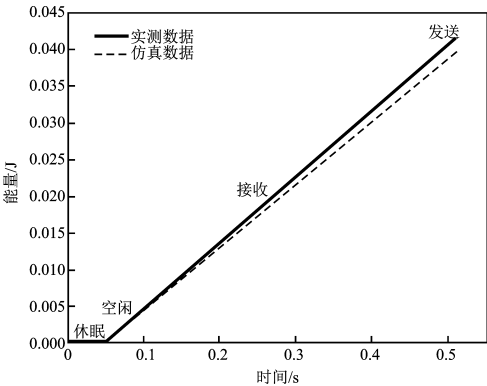


图 2 通信状态能耗对比

4.3 采集能耗实验

使用 CC2530 片内温度传感器进行实验,得到采集能耗,与实测数据进行对比结果如图 3 所示.

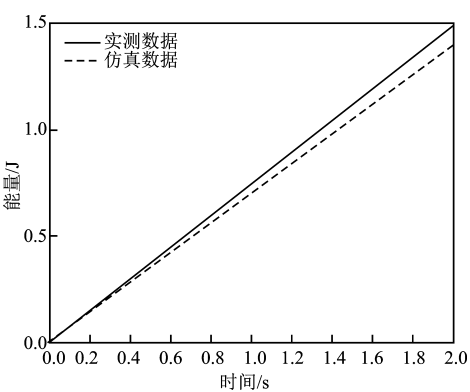


图 3 采集能耗对比

4.4 工作时间实验

无线传感器节点工作时间即传感器节点从开始工作到工作停止的时间. 电源采用 3.7 V 200 mAh 锂电池进行试验, 电池温度系数 α 为 0.008(休眠时为 0.006), 温度 t 为 15℃, 其余参数如 3.1 和 3.2 节所示. 传感器节点在各种工作状态下的工作时间如表 1 所示. 其中休眠状态由于时间太长, 与发送状态交替进行, 对于发送能耗如图 2 所示, 然后通过计算得出实际的休眠时间.

表 1 不同工作状态的节点生存时间

工作状态	算法仿真/h	实测/h
空闲	5.48	5.43
发送	5.71	5.61
接收	5.07	5.03
休眠	127 310	127 300
采集	0.79	0.75

设置节点的周期性工作状态如图 1 所示, 节点仿真和实测的生存时间如图 4 所示. 从图 4 中可以明显地看出节点实测时间和仿真时间相差很小, 能够较为准确地估算出节点使用时间, 较好地解决了节点的时间预测问题.

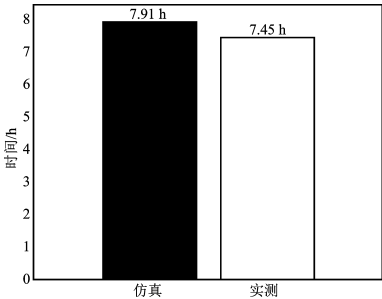


图 4 工作时间对比

5 结束语

本文提出了一种计算无线传感器节点剩余能量

的自主预测算法, 它通过分析电池放电过程, 结合节点能量模型, 从而比较准确地估算出节点的能耗分布和使用时间. 仿真实验和计算结果证明, 本文提出的算法可以对节点的能耗和剩余能量情况进行感知、推理和预测, 提高了对剩余能量和时间估算的准确性, 可以有效直观地观察无线传感器网络的状态, 有利于提高能量使用效率和网络生命期的估算准确性, 为其他能量感知算法提供能量依据.

参考文献:

[1] Helio M S, Claudio M, Paula L, et al. Intrusion detection system for wireless sensor networks using danger theory immune-inspired techniques[J]. International Journal of Systems Science, 2012,23(10):1-28.

[2] 张志东,孙雨耕,刘洋,等. 无线传感器网络能耗模型[J]. 天津大学学报, 2007,40(9):1029-1034.

[3] 陈坚,邹涛,梁根池. 基于能量消耗模型的 WSN 动态电压调节算法[J]. 计算机工程与应用, 2010,46(6): 89-91.

[4] 李文泽. 基于云模型的 WSN 能量消耗平衡研究[J]. 微电子学与计算机, 2014,31(2):90-93.

[5] 夏先进,李士宁,李志刚,等. 基于做功系统的 WSN 能量有效性评价模型[J]. 科学技术与工程, 2013,13(1):3647-3652,3675.

[6] 成小良,邓志超,董志然. 基于无线通信和计算特征分析的能量模型[J]. 计算机研究和发展, 2009,46(12): 1985-1993.

[7] Lu X J, Ding Y S, Hao K R. Immune colonel selection algorithm for target coverage of wireless sensor networks[J]. Int’l J Modeling, Identification and Control, 2011,12(1):119-124.

[8] Li B, Wang W, Yin Q, et al. A new cooperative transmission metric in wireless sensor networks to minimize energy consumption per unit transmit distance[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5):626-629.

[9] Clemotte A, Vargas E A, Toral S L. A zigbee target system running TinyOS[C]// Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International. Canada: IEEE, 2012:1-5.

[10] Shnayder V, Hempstead M, Chen B R, et al. Simulating the power consumption of large scale sensor network application[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Embed Networked Sensor System, Sensys. Baltimore, MP, USA: IEEE, Sensys, 2004:188-200.

图效果,时钟数据恢复电路版图所占面积为 $350\text{ }\mu\text{m}\times 250\text{ }\mu\text{m}$.

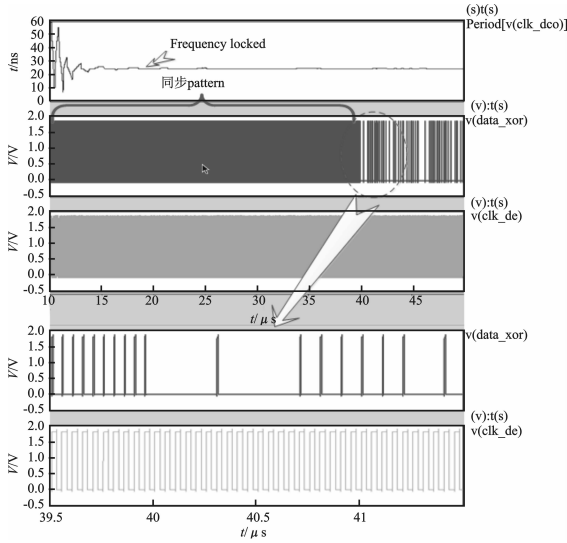


图 8 仿真结果

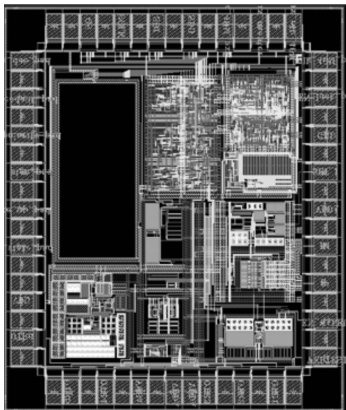


图 9 时钟数据恢复电路整体版图

5 结束语

本文设计了一款应用于隔离通讯芯片的全数字时钟数据恢复电路. 该电路基于单环的锁相环设计, 不需要额外的参考时钟输入, 且锁定速度快, 可移植性好, 对衬底耦合等噪声不敏感, 工作时整体功耗仅为 $1.279\text{ mW}@40\text{ MHz}$, 仿真显示输出峰峰抖动 137.13 ps , RMS 抖动 32.29 ps , 整体版图面积为

$350\text{ }\mu\text{m}\times 250\text{ }\mu\text{m}$.

参考文献:

[1] 高宁, 张长春, 方玉明, 等. 一种高性能盲过采样时钟数据恢复电路的实现[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(6): 137-140.

[2] 尹晶, 曾烈光. 一种快速同步的时钟数据恢复电路的设计实现[J]. 光通信技术, 2007, 31(1): 52-54.

[3] 张刚. CMOS 集成锁相环电路设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.

[4] Chung C C, Dai W C. A referenceless all-digital fast frequency acquisition full-rate CDR circuit for USB 2.0 in 65nm CMOS technology[C]//VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT), 2011 International Symposium on. Hsinchu:IEEE, 2011: 1-4.

[5] Hsu H J, Huang S Y. A low-jitter ADPLL via a suppressive digital filter and an interpolation-based locking scheme[J]. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on, 2011, 19(1): 165-170.

[6] Sheng D, Lan J C. A monotonic and low-power digitally controlled oscillator with portability for SoC applications[C]//Circuits and Systems (MWSCAS), 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on. Seoul:IEEE, 2011: 1-4.

[7] Sheng D, Chung C C, LAN J C. A monotonic and low-power digitally controlled oscillator using standard cells for SoC applications[C]//Quality Electronic Design (ASQED), 2012 4th Asia Symposium on. Penang:IEEE, 2012: 123-127.

作者简介:

陈原聪 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为全数字锁相环、全数字时钟数据恢复电路.
E-mail: chenyancong@ime. ac. cn.

赵 野 男, (1977-), 副研究员. 研究方向为汽车电子 SoC 芯片的设计.

王 彤 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为全数字时钟数据恢复电路.

(上接第 116 页)

作者简介:

杜永文 男, (1974-), 博士, 副教授. 研究方向为嵌入式系统.

冯 珂(通讯作者) 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统、无线传感器网络. E-mail: fengkeld@163. com.

练云翔 男, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统、无线传感器网络.