

一种新型节能无线传感节点的设计与组网

孙行行¹ 卢伟¹ 钱宇宁¹ 严如强¹

摘要

设计了一种节能无线传感节点. 该设计在智能节点的平台, 完成一个小型无线传感网络的搭建, 实现“节点级节能”和“网络级节能”, 从2个方面同时节约能耗, 达到较好的节能目标. 节点节能是通过传感节点的射频功率自适应来实现的, 节点可以自动选取最小必要发射功率, 在保证可靠通信的基础上实现发射功率最小; 而网络节能则是通过估计星型网络和分簇网络2种结构下网络通信的耗能, 然后选取耗能较小的结构形式来实现的. 通过仿真和实验测试, 证明这种节点和由这些节点构成的网络能够顺利实现节点发射功率自适应和组网结构自适应, 达到了较好的节能效果.

关键词

无线传感器网络; 节能; 发射功率自适应; 组网方式自适应

中图分类号 TP393

文献标志码 A

收稿日期 2010-08-27

资助项目 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-09-0297)

作者简介

孙行行, 男, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络及其应用. hanghangsun@gmail.com

严如强(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为制造系统、制造过程监测与诊断, 无线传感器网络, 生物医学信号处理.

ruqiang@seu.edu.cn

0 引言

随着系统微型化以及传感器技术、无线通信技术和片上信号处理技术的发展, 廉价、低功耗的智能无线传感器的制造已经成为现实, 并在发展中不断得到优化. 无线传感网络(wireless sensor networks)是一种分布式的测量系统, 它由大量地理上分散的测量单元组成. 每一个测量单元都是一个低功耗的设备, 其上集成了传感、数据处理和无线通信等模块. 这些测量单元从周围环境中感知相应参数, 经过本地处理, 发送给对应的数据收集点或者基站, 进行进一步的数据汇集和处理^[1-5].

无线传感技术在环境监测中得到了广泛的应用, 包括工业生产、农业生产以及自然环境的监测等, 因为无线传感网络具有自组织、微型化和感知环境的特点, 并且可以在恶劣环境下进行长时间的数据收集. 近些年来, 无线传感网技术在现实生活中的应用越来越广泛, 并且呈现出迅猛增长的趋势. 然而, 当网络越来越大, 需要监测的周期越来越长, 这项技术的发展遇到了瓶颈——能量消耗, 尽管电池可以通过太阳能或者其他的手段充电, 但它仍然限制了无线传感网技术的发展^[6-9].

传感器网络的节点设置具有随机性^[10], 只能确定网络的总体尺寸, 在测量区域内, 节点分布是随机的, 因此无法确定某一个节点距离基站或者数据收集点的距离. 无线通信功率与通信距离具有以下关系式:

$$P_T = (\varepsilon_{\text{amp}} \cdot R) d^\alpha. \quad (1)$$

式中, P_T (T—transmission, 发射) 表示发射功率, ε_{amp} (amp—amplifier, 放大器) 是功率放大器为满足最小误码率的一个增益因子, R 表示数据发送速率, d 表示节点与通信目的地之间的距离, α 与通信环境有关, 通常取 2 ~ 5. 在之前的研究设计中, 总是优先考虑通信的可靠性, 因此在设定节点的通信发射功率时, 以与数据收集点的最远距离进行计算, 即所有的节点发射功率均为^[11]

$$P_T = (\varepsilon_{\text{amp}} \cdot R) d_{\text{max}}^\alpha. \quad (2)$$

其中, d_{max} 表示节点与通信目的地之间的最大距离. 这样, 对于那些距离数据收集点或基站较近的节点来说, 通信耗能一直处于溢出状态. 随着网络尺寸的不断变大和节点数目的不断增加, 被消耗的能量十分巨大. 从这个方面考虑, 影响传感节点寿命的不仅包括电池的寿

¹ 东南大学 仪器科学与工程学院, 南京, 210096

命,更重要的是这种能量的浪费^[12].

基于上文提出的这些问题,为了延长无线传感器网络的寿命,降低能耗必然是一个十分重要的方面.有鉴于此,本文设计了一种无线传感节点,它能够通过动态调节发射功率来实现节能,同时还能根据网络中节点的分布自动调整组网方式,实现整个网络的节能.

本文的第1部分将给出“节点级节能”和“网络级节能”的基本理论;第2部分详细介绍传感器节点的电路设计;为了实现网络的组建和通信,通信流程将在第3部分给出;第4部分给出实际测试的情况和实验数据;第5部分给出本文的结论和设计中有待改进的地方.

1 节能策略概述

本文将要实现的节能策略包括2个部分:节点级的节能和网络级的节能.这2方面的工作实际上是相互联系的.下面分别对二者进行阐述.

1.1 网络级节能

网络级节能主要是通过组网方式的自动切换来实现的^[13].为了阐述网络级节能,首先给出2种不同的组网方式.以农业大棚为例,这2种组网结构介绍如下.

1) 结构1.各个传感节点收集到的数据直接发送到CMU(Central Monitoring Unit,中心监控单元),图1给出了将这种结构应用到温室大棚管理平台上的示意.在每个温室大棚中,传感器收集到的数据,如空气温度、湿度等,将被直接发送给CMU,而不需要经过一系列路由转发.

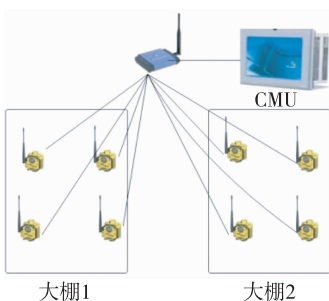


图1 用于大棚监控的结构1组网方式

Fig.1 Structure 1 used in greenhouse monitoring

2) 结构2.在这种方式中,传感器节点将被分割成不同的组,称之为簇.每个传感节点首先将收集到的数据发送给簇头,然后经过簇头转发给CMU,图2

给出了将这种结构应用到温室大棚管理平台上的示意.

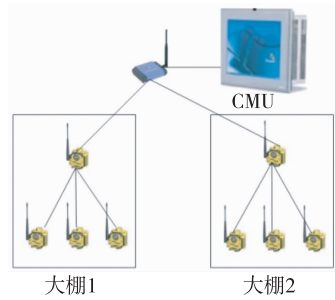


图2 用于大棚监控的结构2组网方式

Fig.2 Structure 2 used in greenhouse monitoring

这2种结构将在组网过程中被选择,网络级的节能正是通过这2种组网结构的切换来实现的,而切换的依据是网络整体的能量消耗.为了得到这个能量消耗,需要收集每个节点通信耗能,这就涉及到节点级节能.

1.2 节点级节能

节点级节能的目的是在保证可靠通信的前提下,使节点的发射功率保持在最小值,即传感节点的发射功率自适应.这里假设发射机天线的增益是固定的,那么节点的通信耗能是由功率放大器的耗能决定的.

发射功率和接收功率的计算公式为

$$P_T = (\varepsilon_{\text{amp}} \cdot R) \hat{d}^\alpha, \quad (3)$$

$$P_R = \frac{P_T}{d^\alpha} = (\varepsilon_{\text{amp}} \cdot R) \cdot \left(\frac{\hat{d}^\alpha}{d^\alpha}\right) = P_s \cdot \left(\frac{\hat{d}^\alpha}{d^\alpha}\right). \quad (4)$$

这里 P_R 表示接收机的接收功率, R 表示数据传输速率, \hat{d} 和 d 分别表示发射机和接收机之间的估计距离和实际距离, $P_s = \varepsilon_{\text{amp}} \cdot R$ 表示接收机灵敏度(接收机可以分辨的最小信号功率).

从式(4)中可以推导出如下结论:如果估计距离 $\hat{d} < d$,那么接收信号将不能被识别,通信失败;如果估计距离 $\hat{d} > d$,也就是说接收到的信号功率大于接收机灵敏度,那么一部分发射功率就将在传输路径中耗散掉,当然这并不会影响信号接收.在这种情况下,节能问题就转化为对发射机和接收机之间通信距离的估计问题.

例如,考虑将结构2的组网方式应用于大棚监测中,当进行簇内数据收集时,数据将由节点发送给簇头,簇头以最大发射功率 $P_{T_{\text{max}}}$ 给其中一个节点发送测试码(test code),通过检测该节点接收到的信号

功率 $P_{R(SHK)}$ (SHK—handshaking, 握手信号), 节点和簇头之间的距离可计算如下:

$$\hat{d}^\alpha \geq \frac{P_{Tmax}}{P_{R(SHK)}} \quad (5)$$

因此, 通过将数据传输的估测距离最小化, 保证可靠通信的最小发射功率的估算公式为

$$P_T = P_S \cdot \frac{P_{Tmax}}{P_{R(SHK)}} \quad (6)$$

2 智能节点硬件设计

2.1 通信模块简介

这里选择美国 TI 公司的 Chipcon CC1101 芯片作为射频通信芯片. CC1101 芯片是一款专门应用于低功率无线通信的低功耗单片收发器. 在 CC1101 中, 接收信号功率 P_R 被转化为一个二进制量 RSSI (Received Signal Strength Indicator, 接收信号强度指示) 表示^[9], 存储在 RSSI 寄存器中. RSSI 与 P_R 之间的关系如下:

$$P_{RSSI} = 10 \cdot \log_{10} P_R \quad (7)$$

当 P_R 以 mW 为单位时, RSSI 单位是 dBm.

由式(6)和(7), 可得

$$10 \cdot \lg P_T = 10 \cdot \lg P_R + 10 \cdot \lg P_{Tmax} - 10 \cdot \lg P_{R(SHK)} \quad (8)$$

其中, $10 \cdot \lg P_T$ 是将发射功率转化为以 dBm 为单位表示. 由式(7)可知, $10 \cdot \lg P_{R(SHK)}$ 指的是 RSSI 在 CC1101 芯片中有一个 PATABEL 寄存器, 该寄存器的值是发射功率以 dBm 为单位表示的值. 以 PATABEL 作为一个变量来表示该寄存器值, 因此根据式(8), 可以计算出最小必要发射功率(PATABEL 寄存器的值)为

$$P_{PATABEL} = 10 \cdot \lg P_R + 10 \cdot \lg P_{Tmax} - P_{RSSI} \quad (9)$$

2.2 传感节点设计

为了对节能策略进行实验测试, 本文设计了一个用于环境温度数据收集的无线传感器节点, 如图 3 所示.

选择 C8051F320 作为传感节点的运算和控制核心, 是因为它具有较高的 CPU 吞吐率和较高的模拟/数字转换率^[10]. 首先, 设计了 C8051F320 的支撑电路以及下载电路; 同时, 设计 RS232 接口是为了在环境监测中与上位机进行通信. 例如, 当 CMU 接收到各个节点的温度数据后, 为了便于技术人员进行分析与后期处理, 这些数值可以在上位机显示器上呈现出来. 在将传感节点应用于实际工作中时, 必须考虑到节点的损坏问题. 有时候节点损坏可能仅仅

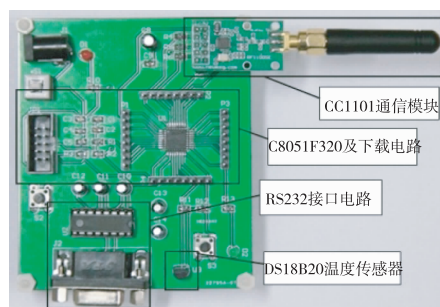


图 3 无线传感器节点实物

Fig. 3 Distribution of wireless sensor nodes

是通信模块或者传感节点平台的损坏, 这时候需要能够快速方便地进行维修和更换, 以保证整个网络系统的正常工作. 基于此考虑, 为射频通信模块设计了一个 DIP (双列直插) 接口插座. 传感器部分采用 DS18B20 数字温度传感器, 用来收集环境温度, 模拟一个实际的传感网络.

3 通信流程设计

已经知道每个传感节点的能耗可以实现最小化, 通过选择合适的组网结构, 还可以进一步地减少整个网络的能耗. 通过前文的讨论, 能够通过 CC1101 射频部分的编程控制来完成节点级的节能, 至于如何实现网络级的节能将在本节讨论.

简单来说, 通信流程是首先通过式(6), 估测每个节点的最小必要发射功率 P_T , 然后 CMU 收集每个节点的 P_T , 进而计算整个网络总的能耗, 来比较哪种组网结构耗能较少, 最后选择耗能较小的组网结构来进行组网通信. 通信流程具体如下:

1) CMU 以最大发射功率 P_{Tmax} 向节点 node1 发送测试码 test code 1, 然后进入等待接收状态;

2) 每个传感节点均处于接收状态, 当 node1 接收到 test code 1 后, node1 从 RSSI 状态寄存器中读取 RSSI 的值, 并将它发送给 CMU, 然后利用式(9)计算 $P_{PATABEL}$;

3) CMU 接收到来自 node1 的 RSSI 值之后, 利用式(9)和(10)估算最小必要发射功率 $P_{T(s1)i}$ ($s1$ 表示在结构 1 组网方式下), 并存储这个值

$$P_{T(s1)i} = 10^{\frac{P_{PATABEL}}{10}}, \quad (10)$$

4) 对网络中的每个节点重复步骤 1)–3), 直到每个节点均被访问;

5) CMU 利用式(11)计算整个网络在结构 1 下的能耗 P_{T1} ,

$$P_{T1} = \sum_{i=1}^M P_{T(s1)i}; \quad (11)$$

6) CMU 以最大发射功率 P_{Tmax} 向簇头 cluster head1 发送测试码 test code 2, 然后进入等待接收状态;

7) cluster head1 接收到 test code 2 之后, 读取 RSSI 寄存器的值, 并存储之;

8) cluster head1 以最大发射功率 P_{Tmax} 向该簇内的第 1 个节点 cluster node1 发送测试码 Test Code 3, 然后进入等待接收状态;

9) cluster head1 接收到 test code 3 之后, 读取 RSSI 寄存器的值, 并将它发送给簇头 cluster head1, 然后利用式(9)计算 $P_{PATABEL2}$;

10) cluster head1 在接收到 RSSI 值之后存储它;

11) 对簇内的每个传感节点重复步骤 8) — 10), 然后将这些 RSSI 值发送给 CMU;

12) 重复步骤 6) — 11), 直到每个簇均被访问到, 然后利用式(9) — (11) 计算结构 2 下网络耗能 P_{T2} ;

13) CMU 比较 P_{T1} 和 P_{T2} , 如果 $P_{T1} > P_{T2}$, 那么 CMU 广播测试码 test code 4, 如果 $P_{T1} < P_{T2}$, 那么 CMU 广播测试码 test code5.

其中 test code 1 用以通知各个传感节点向 CMU 回发 RSSI 值及计算 $P_{PATABEL1}$, test code 2 用以通知各个簇头节点向簇内各个节点发送 test code 3, test code 3 用以通知簇内各个节点向簇头回发 RSSI 值及计算 $P_{PATABEL2}$, test code 4 是通知各个节点以结构 1 方式组网, 各个节点接收到 test code 4 之后设定 $P_{PATABEL1}$ 为发射功率, 并将 CMU 的地址作为目标地址, test code 5 用以通知各个节点以结构 2 方式组网, 簇头接收到 test code 5 之后设定 $P_{PATABEL1}$ 为发射功率, 并将 CMU 地址作为目标地址, 非簇头节点接收到 test code 5 之后设定 $P_{PATABEL2}$ 为发射功率, 并设定对应的簇头地址作为目标地址.

4 组网测试

本文在所设计的传感器节点上实现的节能策略实际由 2 部分构成: 节点级节能和网络级节能, 因此将实验也分析分为 2 部分来进行. 首先, 分析节点级节能策略的性能, 比较节点发射功率固定与节点发射功率自适应 2 种情况下网络的耗能情况; 然后, 分析网络级节能的性能, 比较网络结构固定与组网结

构自适应 2 种情况下的能耗情况.

4.1 固定发射功率与自适应发射功率

该实验将在结构 1 方式组网的情况下, 比较固定发射功率与自适应发射功率的能耗情况. 为了获得实验数据, 首先按结构 1 的方式实现网络的通信, 工作照片如图 4 所示.

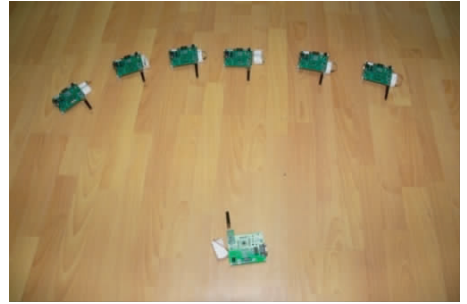


图 4 结构 1 方式组网工作照片

Fig. 4 Network of structure 1 in operation

根据文献[9], 可以得到 CC1101 芯片的输出功率等级与电流之间的一个对应关系表格, 如表 1 所示. 为了保证通信的可靠性, 传统的传感器网络中节点的发射功率总是最大化, 对应于 CC1101, 输出功率等级总是在 10 dBm 上. 当采取节点功率自适应算法后, 节点会根据接收功率自动调节其发射功率, 而不是总以最大功率发射数据. 在实验中, 由于无线通信会受多方面因素的影响, 如温度、湿度、电器辐射、障碍物等, 因此为了结果的准确与可信, 进行了多次的实验, 其数据比较如图 5 和 6 所示.

表 1 CC1101 输出功率等级与工作电流

Table 1 Output power and current of CC1101

输出功率/dBm	工作电流/mA
-30	11.9
-20	12.4
-15	13.1
-10	14.4
0	15.9
5	19.4
7	24.2
10	29.1

首先, 使 MCU 与某一个节点进行通信, 同时测定其功耗情况, 图 5 所示是由 50 次试验结果绘制的曲线. 通过对比, 可以清晰地发现, 在节点上实行节点级节能策略后, 节点的能耗明显低于采用固定发射功率策略的能耗. 通过数据分析, 发现自适应发射

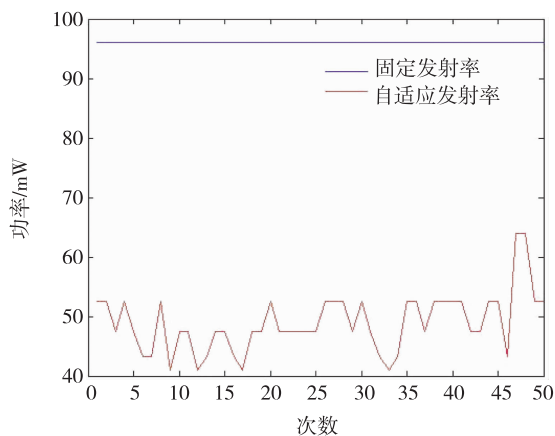


图5 单个节点固定发射功率与自适应发射功率比较

Fig. 5 Energy consumption comparison between fixed and adaptive output power scheme

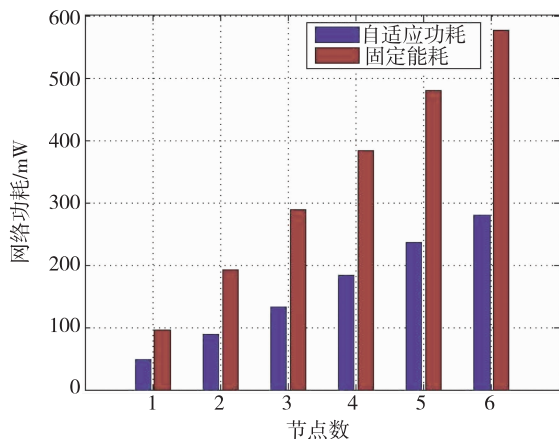


图6 不同节点个数网络功耗比较

Fig. 6 Network energy consumption with different number of nodes

功率后,平均能耗节省了约50%.

图5只是一个节点的情况,当在网络中实行这一策略后,随着网络中节点数目的增加,能量的节省更加可观.如图6所示,给出了随着节点数目增加网络能耗的对比情况.可以看到,固定发射功率的功耗一直是自适应发射功率功耗的约2倍,但随着节点数目的增加,能耗的绝对值是不断增加的.

总之,由图5和6数据对比以及实验分析可知,自适应发射功率相对于传统的固定发射功率有着较为明显的优势,而且随着网络中节点数目的增加,这种优势将会越来越明显.

4.2 结构1与结构2

在这一部分的实验中,将分析组网结构对网络

耗能的影响,即分析组网结构自适应策略对网络能耗的影响.为了使分析更加清晰,使节点适合于分簇组网,也就是结构2方式组网,并使网络分别工作于结构1和结构2,再比较二者的能耗情况.节点的工作图片如图7所示.



图7 结构2方式组网工作照片

Fig. 7 Network of structure 2 in operation

首先,使其按结构2方式组网,然后,按结构1方式组网通信.二者的数据比较如图8所示.

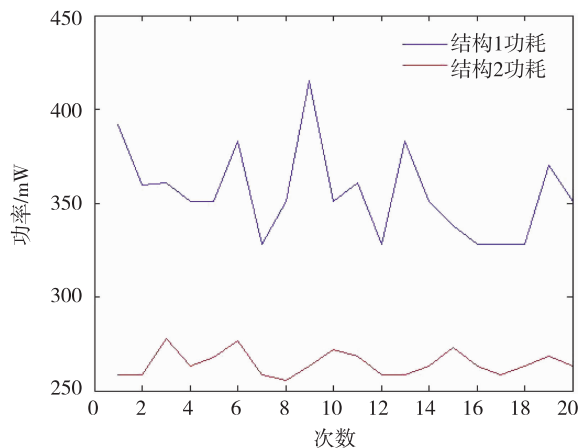


图8 分簇网络中结构1和结构2组网功耗对比

Fig. 8 Energy consumption comparison between structure 1 and structure 2 on tree network

在传统无线传感器网络中,网络一旦形成,组网方式是不会变化的,即使网络拓扑发生了变化,它仍按照最初的方式进行通信,这是不合理的.当网络节点分布如图7所示的时候,为了形成对比,按照结构2组网方式进行通信,获得图8所示的耗能曲线.由图8可以看到,结构2明显更加适合当前的网络拓扑.经过数据比对分析,发现结构2方式下的网络能耗仅为结构1方式下功耗的68%.如果采用组网方式自适应的策略,及时调整组网方式,可以节约大量的能量.

经过这部分实验的分析,可以看到当网络拓扑发生变化时,如果组网方式不变,就会造成能量的浪费.本实验仅仅基于6个传感节点,当网络节点数目增加时,这种浪费将更加明显,因此,根据拓扑形状及时改变组网方式对降低网络能耗、延长网络寿命具有十分明显的作用.

5 结论

本文完成了节能无线传感节点的设计,给出了节点的硬件设计,并分别介绍了各部分电路的作用.在此基础上,提出“节点级节能”和“网络级节能”2种节能策略,并在传感器节点平台上实现了组网测试.

“节点级节能”和“网络级节能”实际上就是节点发射功率和组网方式的自适应,为了给出其节能的效果,本文在实验测试中传统的固定发射功率与固定组网方式进行了比较,可以看到“节点级节能”策略可以节省约50%的能量,“网络级节能”策略可以节省省32%的能量.在实际应用中,如果将2种策略结合使用,节能效果会更加明显.

由于条件有限,在测试中,仅仅采用了6个传感节点,而且为了测试的方便和通信的可靠,采用轮流查询的方式进行通信,因此通信效率比较低,无法应用在实时性较高的监测环境中.在后期,可以采用较多的传感节点,扩大网络规模,进一步探究其节能效果,同时,改变轮流询问的方式,尝试采用载波侦听或者无线唤醒机制来提高网络的实时性.

参考文献

References

- [1] Estrin D, Girod L, Pottie G, et al. Instrumenting the world with wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001: 2033-2036
- [2] Pottie G J, Kaiser W J. Wireless integrated network sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43 (5): 51-58
- [3] 王殊, 阎毓杰, 胡富平, 等. 无线传感器网络的理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
WANG Shu, YAN Yujie, HU Fuping, et al. Theory and application of wireless sensor network [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
- [4] 甘从辉, 郑国强, 唐盛禹. 无线传感器网络的拓扑控制研究 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26 (9): 3214-3218
GAN Conghui, ZHENG Guoqiang, TANG Shengyu. Survey of topology control in wireless sensor networks [J]. Application Research of Computers, 2009, 26 (9): 3214-3218
- [5] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks Journal, 2002, 38 (4): 393-422.
- [6] Alippi C, Anastasi G, Di Francesco M, et al. An adaptive sampling algorithm for effective energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59 (2): 335-344
- [7] Chong C Y, Kumar S P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91 (8): 1247-1256
- [8] Gao R X, Fan Z Y. Architectural design of a sensory node controller for optimized energy utilization in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55 (2): 415-428
- [9] Ettus M. System capacity, latency and power consumption in multihop-routed SS-CDMA wireless networks [C] // IEEE Radio and Wireless Conference RAWCON' 98. Colorado, USA: IEEE, 1998: 55-58
- [10] Tiwari A, Ballal P, Lewis F L. Energy-efficient wireless sensor network design and implementation for condition-based maintenance [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3 (1): 1-23
- [11] Salvadori F, de Campos M, Sausen P S, et al. Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58 (9): 3104-3111
- [12] Gallo D, Landi C, Pasquino N. Multisensor network for urban electromagnetic field monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58 (9): 3315-3322
- [13] 胡致远, 彭强, 刘春艳. 基于节点增益不同的无线网络拓扑控制技术 [J]. 计算机应用, 2009, 29 (10): 2611-2613
HU Zhiyuan, PENG Qiang, LIU Chunyan. Topology control of wireless network based on different transceiver gains [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29 (10): 2611-2613
- [14] Low-power sub-1-GHz fractional-N UHF device family for automotive [M/OL]. (2010-04-16) [2011-06-25]. http: //www. ti. com
- [15] 李建平. C8051F320 在 USB 设计中的应用 [J]. 国外电子元器件, 2005 (4): 54-56
LI Jianping. The application of C8051F320 in design of USB interface [J]. International Electronic Elements, 2005 (4): 54-56

Design and implementation of a new energy-efficient wireless sensor node

SUN Hanghang¹ LU Wei¹ QIAN Yuning¹ YAN Ruqiang¹

¹ School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract This paper presents the design and implementation of a smart wireless sensor node, which is aimed to reduce the energy consumption of the wireless sensor network. On this basis, we set up the wireless sensor network, and realize the node-level and the network-level energy-efficiency. The node-level energy-efficiency, based on the adaptive radio frequency power, assumes that the node can reduce the necessary output power automatically and ensure the reliable communication at the same time. The network-level energy-efficiency is realized through comparing the energy consumption of star network with that of tree network and then selecting the more efficient structure. Experimental test has proved that the designed sensor node is applicable to realize the adjustability of transmission power and network configuration.

Key words wireless sensor network; energy-efficiency; adaptive transmission power; adaptive network configuration