

低功耗无线传感网节点的混合监听休眠方法

张 昱¹, 曹 伟², 邵世祥¹

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;
2. 上海无线通信研究中心, 上海 201210)

摘 要:随着无线传感器网络的演化发展,其应用领域也越来越广泛。例如现有的公共事业抄表系统、建设中的环境实时监测系统以及未来将实现的工业 4.0 中智能工厂监控系统,都会利用大量的无线传感器进行数据监测和采集。这些数据监测采集系统通常需要支持远程数据采集和移动端近距离数据采集两种模式。通过采用这两种模式的不同特点,即:唤醒时延的不同需求以及所能够支持的不同的数据传输速率,提出采用混合监听周期这一方法。该方法能够支持实时的数据监测采集,与单一监听周期相比明显降低了监听功耗,延长了传感器节点的工作时间,完全符合移动端近距离数据采集的实时性需求。

关键词:混合监听周期;实时性;低功耗;无线传感器

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)10-0196-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.10.043

A Hybrid Monitor Sleep Method of Low-power Wireless Sensor Network Nodes

ZHANG Yu¹, CAO Wei², SHAO Shi-xiang¹

(1. College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Wireless Communication Research Center in Shanghai, Shanghai 201210, China)

Abstract: With the evolution of the development of wireless sensor networks, its applications are increasingly widespread. For example, existing public utilities meter reading system, the construction of real-time monitoring systems and environmental future 4.0 intelligent industrial plant monitoring system will use a lot of wireless sensor for monitoring and data collection. These data acquisition systems often require monitoring to support remote data collection and mobile data collection. By using different characteristics of these two modes, which are waking the different needs of delays and supporting different data transfer rates, the hybrid method of listening period is proposed. This approach can support real-time data monitoring collection, and significantly reduce power consumption compared with a single listening period and extend the operating time of sensor nodes, in full compliance with the real-time requirements of data collection in close distance for the mobile terminal.

Key words: mixed SNIFF period; real-time; low-power; wireless sensor

0 引言

随着无线传感器网络^[1]的演化发展,其应用领域也越来越广泛。如现有的公共事业抄表系统、建设中的环境实时监测系统及未来将实现的工业 4.0 中智能工厂监控系统,都会利用大量的无线传感器进行数据监测和采集。这些数据监测采集系统^[2]通常需要支持远程数据采集和移动端近距离数据采集两种模式。

基于无线传感器网络的数据监测采集系统面临的一个主要挑战是功耗^[3],因为大量的智能计量表中传感器节点^[4]都是采用电池供电,不可能经常性地充电或者更换电池。因此这些传感器节点通常采用监听加休眠的工作模式以节省电力消耗。

为了降低传感器节点的能耗,同时保证数据采集的实时性^[5],有必要对传感器网络节点时间异步的监

收稿日期:2015-12-22

修回日期:2016-04-13

网络出版时间:2016-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171093)

作者简介:张 昱(1991-),女,硕士,研究方向为无线通信;曹 伟,博士,高级工程师,研究方向为 OFDM 系统、物理层算法、无线传感网等;邵世祥,硕士,教授,研究方向为移动通信与无线技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160919.0839.012.html>

听休眠方法进行研究。对于低功耗休眠机制的设计,已有文献与技术中一般采用将额外的信息或者手段引入休眠机制的方法,用以减少节点功耗。例如,文献[6]通过节点当前不同工作状态将节点进行分组,每组节点遵循时间同步的工作-休眠周期 T , T 被划分为整体休眠时间 T_s 和整体工作时间 T_w ,提升了节点工作时间的灵活性,实现简单。文献[7]提出了一种融合动态电压调节的传感器休眠机制,此方法相当于引入了一种准休眠状态,其实施前提是传感器节点能够支持在低电压下正常工作,因此对节点硬件有一定的要求。文献[8-10]中分别针对不同的场景提出了不同的优化方式,文献[8]通过改进元胞节点休眠转换机制和信息素更新规则,优化了网络路径;文献[9]提出了基于动态网络的跨层通信协议栈设计方案,并将其应用于奶牛场无线传感器网络的各节点软件设计当中,验证了该方案的可靠性;文献[10]通过将天气条件(太阳能、风能)、环境温度和节点深度纳入休眠机制的设计,使得节点唤醒/休眠时间得以动态调整,有助于降低能耗。

经过大量检索查新,发现现有成果中均未涉及支持远程数据采集和移动端近距离数据采集两种模式下的传感器节点混合监听休眠周期设计方法。因此,文中提出了一种时间异步的混合监听休眠周期设计方法,无需传感器节点与网络的时间同步,能够支持远程数据采集和移动端近距离数据采集模式下的实时数据采集,且相比单一监听模式明显降低了能耗。

1 无线传感网络下数据监控系统的背景

以现有的公共事业抄表系统为例,远程数据采集和移动端近距离数据采集两种模式的示意图如图1所示^[11]。

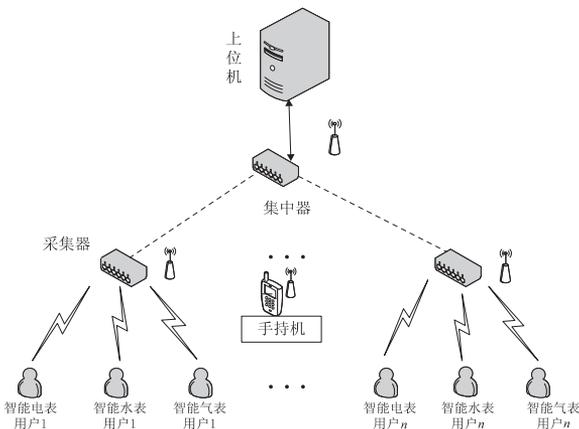


图1 基于无线传感器网络的智能抄表系统架构

远程数据采集是指传感器与采集器之间进行通信,将采集数据发送给采集器,然后通过集中器送至上位机。移动端近距离数据采集是指智能计量表中的传

感器与手持机之间进行通信,采集数据通过手持机发送给集中器,然后送至上位机。

基于无线传感器网络的数据监测采集系统中,传感器节点^[12]通常采用监听加休眠的工作模式以节省电力消耗。在进行数据采集时,传感器节点被远程采集器或者近距离移动端唤醒,常用的监听休眠方法包括时间同步^[13]的监听休眠方法和时间异步^[14]的监听休眠方法。时间同步的监听休眠方法利用了数据监测采集任务的周期性特点,首先在所有传感器节点和远程采集器/近距离移动端之间进行严格的时间同步,然后在预设时段内唤醒传感器节点进行数据读取。此方法的主要缺点是采集时间上灵活性差,一旦失步即会导致数据丢失,且由于大批量数据的集中上报,容易产生干扰而引发数据错误。时间异步的监听休眠方法则提供了更高的灵活性和可靠性,通过对传感器节点进行即时唤醒以获取实时数据,然后即时上报数据以得到系统实时确认。此方法要求传感器节点的监听休眠周期较短,能够及时响应远程采集器/近距离移动端发出的唤醒消息。

为了降低传感器节点能耗,同时保证数据采集的实时性,有必要对传感器网络节点时间异步的监听休眠方法进行研究。由于上位机远程数据采集和移动端近距离数据采集两种模式对传感器节点唤醒时延和数据传输能力的需求有明显差异,文中提出了一种混合监听休眠周期;对远程数据采集和近距离移动端数据采集采用不同的数据传输速率:对于移动端近距离数据采集采用较密集的唤醒周期,对于远程数据采集采用较稀疏的唤醒周期。一方面缩短传感器无线收发时间以减少平均功耗,另一方面提高数据传输速率有助于增强数据采集的实时性。

2 无线传感器网络节点的混合监听休眠方法

为了支持灵活可靠的数据采集,需要对传感器节点进行即时唤醒,远程数据采集和移动端近距离数据采集两种模式对于传感器节点唤醒时延和数据传输能力的需求有如下差异:

(1)时延需求:一般而言,通过采集器进行远程数据采集的实时性要求相对较低,因为远程数据采集经常是成批进行的。而通过近距离移动端进行数据采集则实时性要求很高,因为操作员每次采集单个传感器节点的数据,需要得到及时反馈以提高人工效率。因此在这两种模式下,对于传感器节点进行唤醒的时间要求是不一样的,远程数据采集的唤醒时延较大(分钟级),而移动端数据采集的唤醒时延较小(秒级)。因此对于远程数据采集的唤醒监听可以较为稀疏,而

对移动端数据采集的唤醒监听应该更加密集。

(2) 数据传输速率: 在自由空间中, 10 倍的距离差对应理论路损差为 20 dB, 而在实际通信环境中, 此路损差更大。超过 20 dB 的路损差意味着可以支持的通信速率也有很大差别。一般而言, 远程采集器和传感器节点的距离较远(几十米), 只能采用相对较低的速率进行数据交互。而采用移动端进行数据采集时, 离传感器节点距离很近(约 1~2 米), 可以支持更高的速率进行通信, 以节省传感器节点的工作时间, 使其尽早完成数据传输进入休眠, 从而降低功耗。

基于以上特点, 文中提出了一种基于混合监听周期的传感器节点休眠唤醒方法, 在保证唤醒时延要求的前提下, 明显降低了传感器节点功耗, 有助于延长传感器节点的工作时间。

假设传感器节点的监听休眠周期为:

$$T = T_w + T_s \quad (1)$$

其中, T_w 为传感器节点进行监听的时长; T_s 为传感器节点休眠的时长。

为了唤醒传感器节点, 采集器或近距离移动端采用循环发送唤醒数据包-等待数据的方式, 配合超时定时器来实现。收发端消息交互的时间关系如图 2 所示。图中描述了两种情况, 即传感器节点收到唤醒和未收到唤醒。一般而言, 监听时长 T_w 小于唤醒数据包时长, 正确接收到唤醒数据包后可以继续休眠到剩余唤醒数据包结束, 然后发送数据。

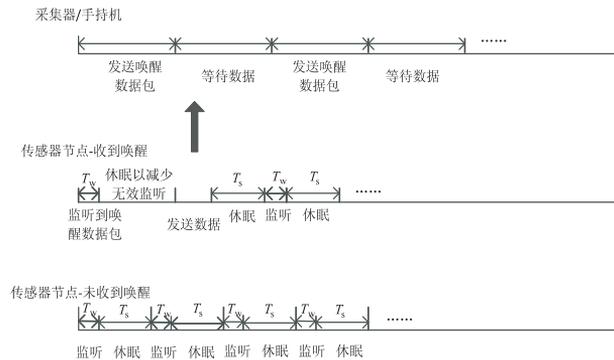


图 2 收发端消息交互时间关系

假设传感器节点能够支持的数据传输速率为 $\{R_a, R_b\}$, 其中, R_a 为传感器节点跟采集器之间的通信速率, R_b 为传感器节点跟近距离移动端之间的通信速率, 且有 $R_b > R_a$ 。假设传感器节点唤醒过程中交互数据量为 M , 则传感器节点监听采集器唤醒消息所需的监听时间为:

$$T_{w,a} = M/R_a \quad (2)$$

而传感器节点监听近距离移动端唤醒消息所需的监听时间为:

$$T_{w,b} = M/R_b \quad (3)$$

可见传感器节点所需要的监听时间和相应的通信

速率呈反比。为了同时支持远程数据采集和近距离移动端数据采集两种模式, 监听时长应取为较大的 $T_{w,a}$, 在整个监听休眠周期中占比为 $\frac{T_{w,a}}{T}$, 相应的监听能耗较高。

考虑到远程数据采集和近距离移动端数据采集的唤醒时延需求差异较大, 提出一种混合监听周期, 如图 3 所示。

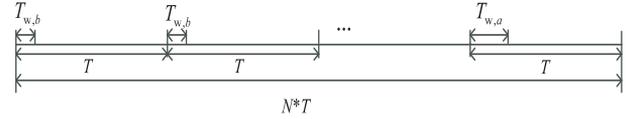


图 3 混合监听周期示意图

在 N 个时长为 T 的监听休眠周期中提供一个时长为 $T_{w,a}$ 的监听窗口, 其余的均为时长为 $T_{w,b}$ 的监听窗口。此时监听时长的占比为:

$$\frac{(N-1)T_{w,b} + T_{w,a}}{NT} < \frac{T_{w,a}}{T} \quad (4)$$

因此能够有效地降低监听能耗。注意, 在时长为 $T_{w,a}$ 的监听窗口中, 传感器节点也能够响应来自于近距离移动端的唤醒需求, 从而完全保证了近距离移动端数据采集的实时性需求。

传感器节点的电池工作时间与其平均功耗呈反比, 而其平均功耗跟其平均工作电流成正比。假设传感器节点在休眠状态下电流为 I_s , 在监听状态下电流为 I_w 。在采用监听时长为 $T_{w,a}$ 的单一监听周期设置下, 传感器节点在一个监听休眠周期 T 内平均电流为:

$$I_1 = \frac{I_w \cdot T_{w,a} + I_s \cdot (T - T_{w,a})}{T} \quad (5)$$

而在文中所提出的混合监听周期设置下, 传感器节点在一个监听休眠周期 T 内的平均电流为:

$$I_2 = \frac{I_w \cdot (T_{w,a} + (N-1)T_{w,b}) + I_s \cdot (NT - T_{w,a} - (N-1)T_{w,b})}{NT} \quad (6)$$

易知, $I_1 > I_2$, 即采用混合监听周期有助于降低传感器节点的平均功耗, 延长其电池工作时间。

3 性能仿真

由于 si4464 芯片能够支持不同的数据传输速率, 且具备超低电流省电模式, 因此被广泛应用于无线传感器网络中, 其具体工作参数如表 1 所示。

表 1 si4464 芯片参数

数据传输速率		电流	
R_a	R_b	休眠时 I_s	监听时 I_w
0.123 kbps	1 Mbps	900 nA	7.2 mA

以该芯片为例, 分析文中提出的混合监听休眠方

法的性能优势。

假设传感器节点唤醒过程中交互数据量 $M = 200$ bits, 远程数据采集时的数据传输速率为 0.123 kbps, 移动端近距离数据采集时的数据传输速率为 1 Mbps, 混合周期中 $N = 60$ 。由式(2)、(3)得知, $T_{w,a} = 1.59$ s, $T_{w,b} = 1.91e - 4$ s。

在不同的监听休眠周期下, 采用单一监听周期和混合监听周期所需的平均电流对比如图 4 所示。

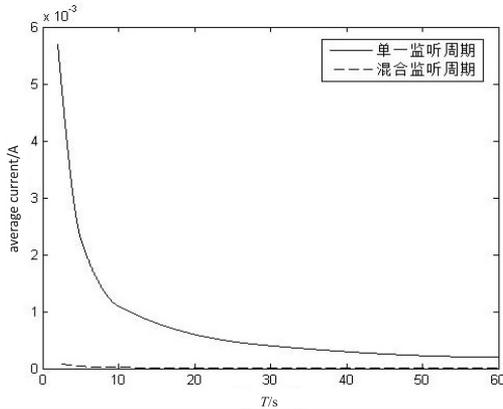


图 4 不同监听休眠周期下平均电流对比图

由图 4 可见, 混合监听周期所需的平均电流远低于单一监听周期。

从图 4 中选出几组不同周期下的数据进行对比, 如表 2 所示。其中, I_1 , I_2 可由式(5)、(6)得到。

表 2 不同监听休眠周期下平均电流对比表

T/s	单一监听周期 I_1/A	混合监听周期 I_2/A
2	0.005 7	$9.684e-5$
5	0.002 3	$3.928e-5$
10	0.001 1	$2.009e-5$
30	0.000 4	$7.30e-6$
60	0.000 2	$4.10e-6$

显然在监听休眠周期较小的时候, 所提出的混合监听周期有更加明显的低功耗优势。在典型取值 2 s 的监听休眠周期下, 单一监听周期和混合监听周期所对应的平均电流差异达到 59.03 倍。可见文中所提出的方法更适用于移动端要求数据采集响应时间较短的情况, 这与移动端近距离数据采集的应用场景需求完全契合。

文中以 si4464 芯片的使用为例, 描述了该方法的原理和实施方式。但是在具体的无线传感器系统应用中, 所提出的混合监听休眠方法的具体实施可以进行相应的变化, 适用于所有含有远程数据采集和近距离移动端数据采集两种模式的数据监测采集系统。

4 结束语

文中混合监听方法通过采用混合监听周期, 对于

唤醒时延的需求差异和在不同路损下的数据传输速率差异, 利用远程数据采集和近距离移动端数据采集两种模式, 有效地降低了无线传感器节点的监听功耗。在基于无线传感器网络的数据监测采集系统中应用广泛(例如工业 4.0 中智能工厂监控、公共事业抄表和环境实时监测等多个领域), 能够支持远程数据采集和近距离移动端数据采集两种模式下的实时数据采集。

该方法无需传感器节点和网络之间的时间同步, 能够支持采集器和近距离移动端两种模式对数据的实时采集, 相比单一监听周期模式明显降低了监听功耗, 在近距离移动端实时性要求较高的场景下功耗节省优势更加明显。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38:393-422.
- [2] 张芸薇. 基于 ZigBee 无线传感网数据采集的设计与实现 [D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- [3] Zou Y, Chakrabarty K. A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 54(8):978-991.
- [4] Bandyopadhyay S, Coyle E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks [C]// Proceedings of INFOCOM 2003. New York: IEEE Press, 2003:1713-1723.
- [5] 刘新辉, 何长铃. 基于无线传感网的变压器实时监测数据采集系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2013(2):89-91.
- [6] 徐 恪, 瞿 贻, 陈文龙. 无线传感器节点双重休眠方法: 北京, CN103476099A [P]. 2013-12-25.
- [7] 李 强. 无线传感器网络节点动态功耗管理机制研究 [D]. 南昌:南昌航空大学, 2013.
- [8] 孙玉文. 基于无线传感器网络的农田环境监测系统研究与实现 [D]. 南京:南京农业大学, 2013.
- [9] 李泉辉. 奶牛场数字化管理的无线通信系统设计研究 [D]. 保定:河北农业大学, 2010.
- [10] 吴 寅. 采用环境能量的自供电无线传感器网络关键技术研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [11] 杨登辉. 无线远传抄表系统的手持机设计与实现 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- [12] Kianpisheh S, Charkari N M. A power control mechanism for sensor node based on dynamic programming [C]// Proc of second international conference on communication software and network. [s. l.]: [s. n.], 2010.
- [13] 张有杰, 陈国庆. 一种节约无线传感网能耗的时间同步方法 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(11):41-44.
- [14] 杨 浩. 异步传感网时间调度方法研究 [D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2013.