

无线传感器执行器网络综述

周 雁¹ 王福豹^{1,2} 黄 亮¹ 李晓辉¹

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)¹ (西北工业大学宽带网络技术研究所 西安 710072)²

摘 要 无线传感器执行器网络是在无线传感器网络基础上引入若干执行器节点衍生出来的一种新型网络模型;它不仅能够感知环境信息、处理数据,还能够主动与监测环境进行交互,执行相应的任务。介绍了无线传感器执行器网络的体系结构、节点硬件结构、协作机制和通信协议,并对近年来国内外研究进展进行了综述,指出了未来的研究方向。

关键词 无线传感器执行器网络,节点设计,协作机制,通信协议,路由协议,传输控制

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Overview of Wireless Sensor and Actor Networks

ZHOU Yan¹ WANG Fu-bao^{1,2} HUANG Liang¹ LI Xiao-hui¹

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)¹

(Institute of Broadband Network Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)²

Abstract The wireless sensor and actor networks(WSANs) derived from wireless sensor networks not only can sense the change of the environment, but also interact with it and perform appropriate actions. This paper reviewed the architecture, hardware structure, coordination mechanism between different nodes, and communication protocol of the WSANs. The survey of the recent researches on WSANs was given and future research directions of WSANs were raised in the last of the paper.

Keywords Wireless sensor and actor networks, Node design, Coordination mechanism, Communication protocol, Routing protocol, Transmission control

无线传感器网络(WSN)是由部署在监测区域内的大量廉价微型传感器节点通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者^[1]。然而传感器节点有限的能量、计算资源和通信能力使得 WSN 通常处于一个被动感知环境的角色。通过在 WSN 中加入一些能量充足、具有较强计算和通信能力的、尤其具有移动性的特殊节点,来使传统意义上的 WSN 不仅具有监测功能,还具有控制和执行功能,以便能够更好地与环境进行交互^[2]。Ian F. Akyildiz 把这种网络称为无线传感器执行器网络(WSANs)^[3],这种特殊的节点称为执行器节点(Actor)。

WSANs 是指通过在监测环境中布撒大量的传感器节点和适量的执行器节点,利用传感器节点监测环境中发生的事件信息,然后把这些信息发送给相应的执行器节点,执行器节点判断、分析并做出相应的动作,从而实现对监测环境中发生的事件的实时处理。与 WSN 只能被动地监测环境不同,WSANs 在检测到信息后,能根据需要快速应答并执行反馈动作,主动改变环境状态以满足用户需求。WSANs 这一特点也使得它在环境监控、健康监测、智能家居、动物定位和跟踪、智能交通、精准农业等民用领域和未来无人化战争中有着更为广阔的应用前景^[4]。

本文第1节介绍无线传感器执行器网络体系结构及其特

点;第2节分析节点的硬件结构;第3节阐述传感器-执行器、执行器-执行器间的协作机制以及目前的研究进展;第4节综述底层通信协议、路由和传输控制协议的研究现状;最后总结全文,并指出未来的发展方向。

1 无线传感器执行器网络体系结构

1.1 网络构成

图1是WSANs的网络示意图。在该网络中存在3种节点:传感器(Sensor)、执行器(Actor)以及汇聚节点(Sink Node)。传感器节点用来采集环境中的数据;执行器不仅能采集数据,还可以根据需要执行相应动作,处理监测到的事件;汇聚节点负责整个网络的协调,实现采集信息的汇总并与传感器/执行器节点进行远距离通信。为了方便用户的操作,可在WSANs中配备一个网关,方便用户通过Internet或其他网络管理整个WSANs^[5]。

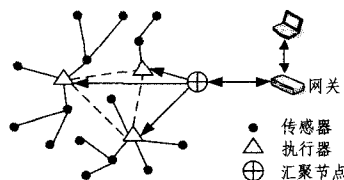


图1 无线传感器与执行器网络示意图

到稿日期:2012-03-26 返修日期:2012-05-13

周 雁(1987—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:zh2580481@126.com;王福豹(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、网络与信息安全等;黄 亮(1985—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络等。

1.2 网络结构

根据任务处理方式的不同,文献[3]提出了两种基本结构:一种为传感节点采集数据后直接发送给临近的执行器节点,执行器节点根据收集到的信息执行相应的任务,其称为全自动结构(Automated Architecture, AT)或无控制中心结构,如图 2(a)所示;另一种则需要把感知数据路由到 Sink 节点,然后由 Sink 节点给相应的执行器发送指令,执行器接受到指令后执行相应的任务,这种称为半自动结构(Semi-Automated Architecture, ST)或有控制中心结构,如图 2(b)所示。

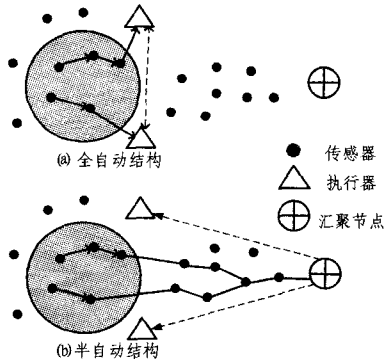


图2 WSNs网络结构

这两种结构各有优点。半自动结构与 WSN 结构很相似,因此在 WSN 中提出的很多算法和协议都可以很容易应用于该结构,无需开发全新的算法和通信协议,例如文献[6]中利用 zigbee 技术构建智能空间中的 WSNs,实现了室内温度、湿度和光照的采集,并对台灯、窗帘、空调等设备实现自动化控制。全自动结构有两个主要优点:(1)延时低。由于传感器采集的信息不需要传输给 Sink 节点而是直接传输给临近的执行节点,缩短了传输路径,大大减少了传输延时。(2)更长的网络寿命。同半自动结构相比,全自动结构不存在 Sink 节点能量空洞问题,因而网络寿命更长。

文献[7]中提出了一种协同结构,如图 3 所示。在这种结构中,传感器节点通过单跳或多跳路由向执行器节点传输数据信息,执行器对数据分析处理后,在采取行动之前与汇聚节点协商。其中汇聚节点可以看作是特殊类型的执行器,它与其他执行器通过单跳或多跳建立连接,参与任务的分配。这种结构实际上是全自动结构和半自动结构的结合体,具有更普遍的意义。

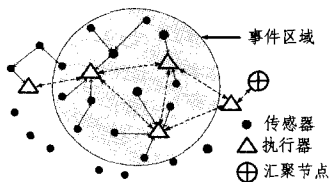


图3 协同结构

2 无线传感器执行器网络节点硬件结构

传感器节点与执行器节点是 WSNs 中最基本的要素。设计节点时应综合考虑功耗、成本、处理与存储能力、环保等因素,并与实际应用环境相结合。传感器节点大量部署在监测环境中,使用有限的能量完成信息的获取与传输,为了延长网络寿命,设计节点时应尽可能采用低功耗技术和能量管理策略降低能耗。执行器节点的能量一般比较充足,它的设计

则要切实考虑应用环境的需求,以及合适的执行装置。图 4 是传感器节点和执行器节点的一般硬件架构。

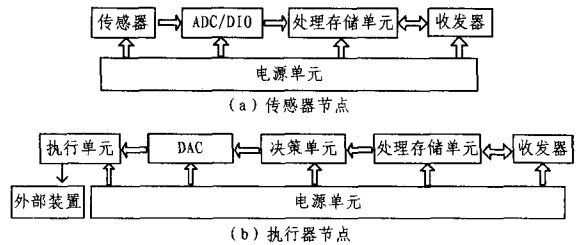


图4 WSN节点硬件框架

传感器节点通常由传感单元、模数转换、处理器及存储、收发器、电源单元等几部分组成。传感器负责监测如光线、温度、声音、烟雾、红外等物理信息,收集到的模拟信号经模数转换后送到处理器进行分析,然后经收发器发送给执行器,整个系统由电源模块提供能量。执行器节点由收发器、处理存储单元、决策单元、数模转换、执行单元、电源单元组成。执行器收到传感器发送的事件信息,由决策单元进行综合、分析后发出指定的动作指令,这些指令经过数模转换送到执行单元,控制外部装置执行相应的任务。

在一些应用场合下,传感器节点和执行器节点合二为一,这类节点的典型代表就是网络化可移动机器人。这种集成的节点不仅可以通过自身携带的各种传感器感知外部环境的信息,还可以通过组网的方式在网络中和其他节点共享信息,通过协同工作的方式完成任务。目前这类特殊的节点并不多,比较有代表性的有美国南加州大学的 Robomote^[8]、加州大学伯克利分校的 CotsBots^[9]、美国 Notre Dame 大学的 Micabot^[10]、美国犹它州立大学的 MASmote^[11]等。国内关于这类节点的研发已经开始。文献[1]中作者用玩具车作为移动平台,研制了 Racemote 节点,这些节点的稳定性和实用性还有待完善。

3 无线传感器执行器网络协作机制

在 WSNs 中,每个节点的信息探测范围、通信半径、计算能力等资源是有限的^[12]。由于其分布式特性,网络中存在大量节点,不可能由人员直接操作每个节点,而且在大多数情况下,单个节点不能获取全网信息,因此 WSNs 必须通过协作来协调各节点间的行为,使其保持高度的一致性,实现 WSNs 的总体功能目标。设计协作机制时需要综合考虑以下几点:

- 1)资源利用最大化:即均衡各个节点的负担,以延长网络的生命周期。
- 2)实时性:执行器能快速响应各种任务,尤其是实时目标追踪和机器人自主攻击等实时性很高的任务。
- 3)事件报告的准确性:如果单个传感器报告的信息不准确或存在感知盲区时,需通过多维感知、信息融合等技术达到事件的准确报告。

WSNs 节点间有 3 种类型的协作通信:传感器与传感器、传感器与执行器以及执行器与执行器。传感器节点之间的协作在 WSN 中已有大量研究,因此在 WSNs 中主要研究后两种协作方式。

3.1 传感器-执行器协作

Ian F. Akyildi 在文献[3]中把传感器节点和执行器节点

之间的协作分为两种情况进行研究,分别为单执行器(Single-Actor,SA)和多执行器(Multi-Actor,MA)。所谓的单执行器就是只有一个执行器可以接收事件区的信息,而多执行器则是多个执行器都可以接收到事件区域的信息。在SA中,可根据执行器节点与事件区域的距离、执行器当前的能力和作用范围等因素来选择执行器节点。SA中不存在执行器节点的相互协调,事件的反应速度会比较快,但事件区中所有传感器节点需要进行复杂的分布式协调以决定选取哪个执行器节点,这种情况下传感器节点的能耗会很大,导致传感器节点更容易失效。在MA中,传感器节点各自决定把数据传送给哪些执行器,传感器节点间可以不进行协调,但这样就可能导致激活过多不必要的执行器,同时被激活的执行器间也需要协调以决定任务的执行方式。可以通过分簇的方法使事件区的传感器各自把数据传给各自簇内的执行器节点,以解决激活过多执行器的问题。

目前提出了一些针对传感器与执行器间的协作的方法。文献[13]中根据一个事件驱动分簇示例,提出了一种传感器与执行器协作的框架;文献[14]把无线传感器与执行器网络中的通信问题和协作问题放在统一的框架中一并进行处理,这样可以提高网络资源的利用率,减少通信延时;文献[15]提出了基于单执行器节点任务的分布式协调机制,即在网络中确立一个主决策节点传感器根据距离事件中心的距离远近,把信息传输给相应的执行器节点执行任务。

3.2 执行器-执行器协作

在WSANs中,根据任务分配方式,可以将任务分为单一执行器任务(SAT)和多执行器任务(MAT)。SAT是指一个任务由一个指定的执行器去完成,MAT是指任务由多个执行器协作完成。执行器可以根据任务发生的类型、地点、任务的复杂度等决定采用哪种任务执行方式。SAT方式下,执行器在执行任务时不需要和其他执行器通信,因此完成任务的时间较短。而在MAT状态下,各执行器在执行任务的过程中需要相互协调,根据事件的动态变化调整执行器的行为,由于协调机制增加了计算和通信负载,因此会产生一定的网络延迟,消耗更多的资源。

文献[13]提出了一种执行器节点协作模型,其将整个监测区域划分为多个区域,执行器负责处理发生在各自区域的事件;文献[15]提出了一种多执行节点协调算法,其引入基于进化算法的多目标优化机制,把执行器的选择转换为多目标组合优化问题并进行求解;文献[16]提出了一种适用于执行器与执行器间有效协调的基于合同网的决策方法,该方法通过仿真实验验证了其性能,但模型假设条件过多,可实施性较差。

从当前的研究现状来看,WSANs中各种类型节点间的协作是一个研究热点。尽管相关研究人员对其协作机制进行了一定研究,但是这些研究大多还处于理论阶段,研究成果较少,因此WSANs的多点协作问题仍然有待进一步研究。

4 无线传感器执行器网络通信协议

目前,工业界和学术界均还没有给出完全适用于WSANs的协议标准和协议栈。文献[3]提出了一种WSANs的通信协议模型,如图5所示。

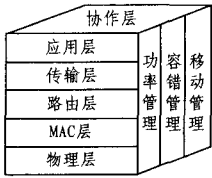


图5 WSN协议栈

该模型将协议分为3个面:管理面、通信面、协作面。管理面的功能主要有功率管理、移动管理和容错管理,主要负责监测和控制传感器节点或执行器节点,同时也会为协作面提供必要的节点信息。通信面就是通信协议栈,主要包括物理层、MAC层、路由层、传输层和应用层,为网络提供通信功能。协作面根据从通讯面和管理面接收到的信息决定节点作出何种动作。

WSANs中有3种类型的通信流:传感器-传感器、传感器-执行器、执行器-执行器。因此WSANs的通信协议比普通的WSN复杂一些。由于执行器之间通过协作完成任务,并且通常具有移动性,因此可以把执行器节点组成的通信网络看作是Ad hoc网络。WSANs通信协议的设计要充分考虑到网络的异构特性,下面将对底层通信标准、路由层、传输控制层进行分析。

4.1 底层通信标准

目前在WSANs的一些简单应用中底层通信大都采用IEEE 802.15.4标准,该标准描述了低速率无线个人局域网(WPAN)的物理层(PHY)和媒体接入控制(MAC)规范。IEEE 802.15.4虽然在功耗上很具优势,但在传输速率上不能完全满足WSANs的要求,因此有研究者开始研究有更高传输速率的IEEE802.11技术在WSANs中的应用^[17,18]。事实上,有很多种无线技术标准都存在应用于WSANs的可能,表1比较了3种可能应用于WSANs的无线标准的主要技术参数。

表1 几种无线标准的比较

技术标准	频段	速率	传输距离	组网形式
IEEE 802.15.3	2.4GHz	11-55Mbps	10m	Ad hoc
IEEE 802.15.4	868/915MHz	40kbps	75m	Ad hoc
	2.4GHz	250kbps	75m	Ad hoc
IEEE 802.11g	2.4GHz	54Mbps	140m	Ad hoc/Ap
IEEE 802.11n	2.4GHz/5GHz	300Mbps	250m	Ad hoc/Ap

表1中的3类标准均支持Ad hoc网络拓扑。IEEE 802.15.3是高速率无线个人局域网的物理层和无线媒体接入控制规范,它支持高达55Mbps的传输速率,适合在小于10m的距离内传输数据。相比于IEEE 802.15.4,IEEE 802.15.3的传输速率有明显提高,可以支持图像和视频的传输,但它的作用范围有限,增大距离将导致传输速率的下降。IEEE 802.11是无线局域网的标准,它在传输速率和传输距离上均优于IEEE802.15.4,且采用了扩频技术,因此有更高的安全性。但是IEEE 802.11的功耗远大于表中另外两个标准,这也是限制IEEE 802.11在WSANs中广泛应用的一个最重要因素。因此,需要在传输距离、传输速率和功耗3方面作出均衡,通过裁剪或增加底层协议栈的功能达到WSANs的应用要求。

4.2 路由协议

WSANs路由协议是通信协议研究的一个热点。在

WSANs 中,当两个节点间不能直接通信时,就需要网络层实现信息的多跳中继。由于 WSANs 特殊的异构性质,其路由协议应该满足传感器与传感器、传感器与执行器、执行器与执行器间的混合路由。现有的 WSN 或 Ad hoc 网络的路由协议并不完全适用于 WSANs。文献[19]比较了几种经典的 MANET 路由协议在 WSANs 中的性能,该文认为节点的数量和执行器节点的移动性决定了路由性能的好坏。文献[20]提出了一种基于地理位置的按需路由协议,该协议充分利用传感器节点的静态特性,辅助完成动态的执行器节点的路由发现,从而避免了对移动节点定位技术的依赖。当网络规模很大时,一般考虑采用分簇路由协议。此时执行器节点可以作为簇头,传感器节点作为簇成员,但是执行器节点自身的移动性很强,对网络拓扑结构的影响十分大。因此,分簇路由协议最主要的问题便是什么时候形成簇,如何选择簇头等^[2]。文献[21]提出了一种适应目标的路由协议 RAT,该协议允许传感器节点和执行器节点进行动态通信,利用执行器节点的移动性,形成动态责任簇,以确保对紧急事件的较快的反应时间。文献[22]研究分簇策略与功率控制技术对自组织网络实时性的影响,提出了一种可适用于 WSANs 的能量有效的实时分簇路由协议——RECRP,该协议采用两级成簇策略使各类节点稳定成簇,采用能量有效性算法使网络中的传感器节点轮换担任簇首达到延长网络寿命的目的。

4.3 传输控制

传感器收集的信息必须按时有效地传输给执行器,执行器在协同工作时也必须保证互相交换的信息准确可靠,因此要求网络提供端到端的可靠传输服务。但是由于传感器节点的能量、计算和存储资源有限,传输控制协议不宜过于复杂。目前研究人员为无线传感器网络和 Ad hoc 网络提出了很多种传输协议,但这些协议大多不能达到无线传感器执行器网络可靠性和实时性的要求,并且远远达不到实际应用的需求。文献[23]提出了一种实时、可靠的传输协议——(RT)2,该传输协议能够进行拥塞控制,并且能够实时、可靠地传输事件信息。文献[24]对(RT)2 传输协议进行了改进,从而减少了冗余传输,进而减少了能量消耗。文献[25]提出了一种容错的传输协议——LOFT,该文认为 WSANs 中的数据传输应该能够抵抗传输失败带来的影响,并且能够考虑被报告数据的重要性和新鲜程度。该协议能够达到无线传感器与执行器网络可靠性的要求,但并没有考虑到实时性的要求,而 WSANs 在执行复杂任务时各节点尤其是执行器节点间必须实时地交互信息。

结束语 本文对 WSANs 的基本概念、节点设计、节点协作机制以及网络协议做了详细介绍,重点分析了 WSANs 节点协作机制和通信协议技术的发展现状,对国内外的一些重要研究成果进行了简介。WSANs 在不断发展的同时面临很多需要解决的问题,以下给出几点值得研究的方向。

1) 协作机制的研究

为了弥补单个传感器探测信息不准确、遇到探测盲区等缺陷,需要多个传感器协作采集信息并进行信息融合以达到对目标状态的准确识别;在执行任务时,通常需要多个执行器协同动作、共享信息,因此节点间协作信息采集和任务协作机制是未来的研究重点之一。

2) 通信协议标准的研究

WSANs 通信协议的研究是目前的研究热点。虽然研究人员针对协议各层都提出了不少方法,但大多处于理论验证阶段,且很多没有考虑跨层优化的问题。考虑到 WSANs 的异构性、实时性和可靠性要求,节点能量、处理存储等资源受限的特点,以及节点移动造成的网络链路和路由失效等问题,高可靠、低功耗、支持实时传输和动态拓扑的通信协议标准也是未来值得研究的方向。

3) 任务盲区修复的研究

WSANs 在无人参与或人员不易到达的危险环境中工作时,传感器节点存在失效的可能,并且在多执行器移动的情况下,传感器节点收集到的信息不能很快有效地传给执行器。因此,网络间歇连通、拓扑结构变化导致的网络漏洞和任务盲区如何修复的问题亟待解决。

参 考 文 献

- [1] 庄伟,宋光明,魏志刚,等.具有机动能力的无线传感器网络节点的设计与实现[J].吉林大学学报,2007,37(4):939-943
- [2] Cai Zi-xing, Ren Xiao-ping, Hao Guo-dong, et al. Survey on Wireless Sensor and Actor Network[C]//Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. June 2011:788-793
- [3] Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks;research challenges[J]. Ad Hoc Networks,2004,2(4):351-367
- [4] Sabri N, Aljunid S A, Ahmad R B, et al. Towards Smart Wireless Sensor Actor Networks; Design Factors and Applications [C]//2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, ISIEA2011. 2011:704-708
- [5] Zhang Shu-qin, Cui Yan, Dong Zhi-yong, et al. A Middleware Platform for WSAN based Application Systems[C]//Proceeding-5th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, ICCIT 2010. 2010:981-986
- [6] 台宏达.智能空间中的无线传感执行网络研究[D].济南:山东大学,2010
- [7] Stojmenovic I. Energy conservation in sensor and sensor-actuator networks [C]// Wireless Ad hoc networking; personal-area, local-area, and sensory-area networks. 2007:107-133
- [8] Lembke K, Kietlinski L, et al. Robomote: Enabling Mobility In Sensor Networks[C]//Proceedings-ISIE 2011; 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2011:940-944
- [9] Bergbreiter S, Pister K S J. CotsBots: An off-the-shelf Platform for Distributed Robotics[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2003:1632-1637
- [10] McMickell M B, Goodwine B, Montestruque L A. MICAbot: A Robotic Platform for Large-scale Distributed Robotics [C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2003:1600-1605
- [11] Wang Zhong-min, Song Zhen, et al. MASmote-A mobility node for MAS-net (mobile actuator sensor networks)[C]//Proceedings-2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE ROBIO 2004. 2004:816-821
- [12] 张丽.无线传感执行网络中协作机制及算法的研究[D].武汉:武汉理工大学,2007
- [13] Melodia T, Pompili D, et al. A Distributed Coordination Frame-

- work for Wireless Sensor and Actor Networks[C]// Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). 2005;99-110
- [14] Melodia T, Pompili D, et al. Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(10): 1116-1129
- [15] 李洪峻, 李迅, 马宏绪. 无线传感执行网络的协调机制研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 250-253
- [16] 张丽, 刘有源, 邓莹, 等. 无线传感执行网络中协作机制的研究[J]. 交通与计算机, 2007, 25(134): 48-51
- [17] Maadani M, Motamedi S A. EDCA Delay Analysis of Spatial Diversity in IEEE 802. 11-Based Real-Time Wireless Sensor and Actuator Networks[C]// 2011 8th International Symposium on Wireless Communication Systems. 2011; 675-679
- [18] Maadani M, Motamedi S A, Safdarkhani H. An Adaptive Rate and Coding Scheme for MIMO-Enabled IEEE 802. 11-Based Soft-Real-Time Wireless Sensor and Actuator Networks[C]// ICCRD2011-2011 3rd International Conference on Computer Research and Development. 2011; 439-443
- [19] Garcia M, Coll H, Bri D, et al. Using MANET protocols in Wireless Sensor and Actor Networks[C]// Proceedings of the 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2008; 154-159
- [20] 徐宏勤, 洪承镐, 王智. 家庭自动化无线传感器/执行器网络路由协议的设计[J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 624-632
- [21] Shah G A, Bozyigit M, Aksoy D. RAT: Routing by Adaptive Targeting in Wireless Sensor/Actor Networks[C]// Proceedings of the 2007 2nd International Conference on Communication System Software and Middleware and Workshops. COMSWARE 2007. Jan. 2007; 1-9
- [22] 李方敏, 徐文君, 刘新华, 等. 无线传感器/执行器网络中能量有效的实时分簇路由协议[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 26-33.
- [23] Gungor V C, Akan O B, Akyildiz I F. A Real-Time and Reliable Transport (RT)² Protocol for Wireless Sensor and Actor Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(2): 359-370
- [24] Wada T, Kitamoto H, Fukuhara T, et al. A Transport Protocol with Energy Consumption Reduction by Reducing Redundant Transmissions in Wireless Sensor and Actor Networks[C]// IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers, and Signal Processing. 2009; 302-307
- [25] Ngai C-H, Zhou Yang-fan, et al. LOFT: A Latency-Oriented Fault Tolerant Transport Protocol for Wireless Sensor-Actuator Networks[C]// Global Telecommunications Conference. 2007; 1318-1323

(上接第 20 页)

- [46] Arthi R, Murugan K. Localization in wireless sensor networks by hidden Markov model[C]// 2010 Second International Conference on Advanced Computing (ICoAC). 2011; 14-18
- [47] Wang Y B, Vuran C M, Goddard S. Stochastic analysis of energy consumption in wireless sensor networks[C]// IEEE Communications Society, IEEE Second 2010 proceedings. 2010; 1-9
- [48] Wang Xian-feng, Xiang Jun, Hu Bin-jie. Evaluation and improvement of an energy model for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(9): 1318-1323
- [49] Howitt I, Neto R, Wang J. Extended energy model for the low rate WPAN[C]// 2005 IEEE International Conference on Mobile Adhoc And Sensor Systems. 2005; 315-322
- [50] 高研. 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
- [51] 李彩云. 无线感知网络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
- [52] 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
- [53] Kan B Q, Cai L, Zhu H S. Accurate energy model for WSN node and its optimal design[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(3): 427-433
- [54] 崔海霞, 韦岗, 余永聪. 无线传感器网络的能耗分析[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(5): 15-21
- [55] Staehle B, Staehle D. Impact of energy models on energy efficient sensor network routing[C]// 2007 IEEE International Conference. 2007; 1-9
- [56] Wang Q, Hempstead M, Yang W. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices[C]// Sensor and Ad hoc Communications and Networks. 2006; 286-295
- [57] Mansour H, Yu Jin-long, Ma Shu-hui. An energy model and network optimization schemes for wireless sensor networks based on the traced data flow[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(4): 505-510
- [58] Hormann L B, Glatz P M, Steger C, et al. Designing of efficient energy harvesting systems for autonomous WSNs using a tier model[C]// 2011 18th International Conference on Telecommunications (ICT). 2011; 174-179
- [59] Cheng X L, Deng Z D, Dong Z R. A model of energy consumption based on characteristic analysis of wireless communication and computation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 1985-1993
- [60] Wu Tian-ying, Yue Kun, Liu Wei-yi. An energy-efficient coalition game model for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. 2011; 4940-4945
- [61] Chouhan S, Balakrishnan M, Bose R. A framework for energy consumption-based design space exploration for wireless sensor nodes[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2009, 28(7): 1017-1024
- [62] Senn E, Laurent J, Juin E, et al. Refining power consumption estimations in the component based AADL design flow[C]// Forum on Specification and Design Languages. 2008; 173-178
- [63] Dhoub S, Senn E, Diguët J, et al. Model driven high-level power estimation of embedded operating systems communication services[C]// 2009 International Conferences on Embedded Software and Systems. 2009; 475-481
- [64] Feiler H P, Gluch P D, Hudak J J. The architecture analysis & design language (AADL): an introduction[S]. USA: International Society of Automotive Engineers, 2006
- [65] 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