

基于异构分簇机制的 IPv6 WSN 系统设计与实现

常英亮,秦雅娟,高德云,张琳娟

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘要:为了满足传感器节点大规模部署的需求,文中设计并实现了基于异构分簇机制的 IPv6 WSN 系统。系统中,簇内传感器节点基于 Contiki 操作系统,完成传感数据的采集,并将采集数据通过 802.15.4 协议以单跳或多跳形式发送到簇首;簇首节点基于 Linux 操作系统,通过 802.11g 协议以自组织形式组网,完成传感信息的高速率传输以及传感器采集数据在网关的汇聚。通过网关中的嵌入式 Web 服务器,可以实现对传感器网络的实时远程监测。实验表明,该系统保证传输链路稳定可靠,满足大量传感器采集数据高速远距离传输要求,具有良好的应用性和可扩展性。

关键词:无线传感器网络;IPv6;异构分簇;AODV 协议;嵌入式 Web 服务器

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)08-0147-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.09.037

Design and Implementation of System for IPv6 WSN Based on Clustered Heterogeneous Mechanism

CHANG Ying-liang, QIN Ya-juan, GAO De-yun, ZHANG Lin-juan

(College of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to meet the needs of large-scale deployment of the sensor nodes, design and implement a system for IPv6 wireless sensor network based on clustered heterogeneous mechanism. In this system, the cluster nodes are based on Contiki operating system to collect data. The cluster nodes transmit collected data to the cluster head nodes in single hop or multi-hop way with 802.15.4 protocol. The cluster head nodes are based on Linux operating system and build network by self-organization with 802.11g protocol to transmit collected data to the gateway at a high speed. With accessing embedded Web server in gateway, users can monitor wireless sensor network remotely anytime. Experiments show that the system ensures transmission link is stable and reliable. The system meets the needs of transmitting a large of collected data long distance in high speed and has good applicability and expansibility.

Key words: Wireless Sensor Network; IPv6; clustered heterogeneous mechanism; AODV protocol; embedded Web server

0 引言

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Network)^[1-3]中大量部署着具有计算能力和无线通信能力的微型传感器节点,能够根据要求对指定环境目标进行监测,具有功耗小、成本低、自组织等特点。随着无线传感器网络应用的日益广泛^[4-5],用户对于传感器节点大规模部署的需求不断提高。然而,基于 IEEE802.15.4 协议的无线传感器网络中,传感器节点的大规模应用面临着以下几个问题^[6]:传感器节点既是数据采集设备又需要起到中间路由作用,而由于自身限制,无法提供足够资源支持大规模应用;传感器网

络中并不是流经每个传感器节点的数据量都是一样的,这种数据量的不均衡性使得某些传感器节点的能量过早耗尽,影响了整个传感器网络的性能和寿命;外界环境的变化会影响无线链路的连通性,进而容易改变传感器网络的拓扑结构,造成传感器网络的不稳定性。

无线传感器网络的异构分簇机制是一种解决 WSN 大规模应用的技术,学术界对此进行了深入研究^[7-9]。研究领域包括 WSN 架构、路由算法及分簇算法等。文中针对大规模 WSN 面临的传感器节点资源与能量受限的现状,设计并实现了基于异构分簇机制

收稿日期:2012-11-21

修回日期:2013-02-24

网络出版时间:2013-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61272504);国家科技重大专项(2012ZX03005003)

作者简介:常英亮(1988-),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络;秦雅娟,博士,教授,主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网;高德云,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1721.028.html>

的 IPv6 WSN 系统,以实现大规模无线传感器网络中数据的高速远距离传输。

1 系统架构

本系统由 IPv6 微型传感器节点、ARM 节点、网关以及客户端组成,其中,IPv6 微型传感器节点作为簇内节点,ARM 节点作为簇首节点。簇内节点基于 Contiki^[10-12] 操作系统建立 IPv6 协议栈,仅配置一个基于 IEEE802.15.4 协议的无线通信接口,而 ARM 节点和网关则是基于 Linux 操作系统的硬件平台,同时配备了具有 IEEE802.15.4 和 IEEE802.11g 的双通信接口。Contiki 操作系统是一个开源、可高度移植的多任务操作系统,提供了完整的网络协议栈以及低功耗无线电通信机制,适用于大规模 WSN 中的簇内节点部署。Linux 操作系统是一个基于多任务、多用户,支持多线程和多 CPU 的操作系统,为大规模 WSN 中的簇首节点提供了强大数据处理和转发能力。系统整体架构如图 1 所示。

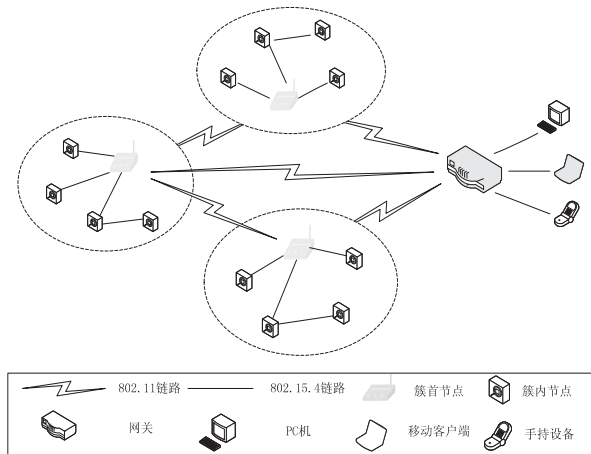


图 1 系统整体架构

每个簇中部署了大量簇内节点和一个簇首节点。簇内节点支持 802.15.4 协议,并通过 802.15.4 接口进行感知数据的发送。簇首节点支持 802.15.4 和 802.11 双协议栈,一方面通过 802.15.4 接口进行感知数据的接收,另一方面则通过 802.11 接口彼此进行信息交互,并通过基于 IPv6 的 AODV 协议进行自组织组网,实现网络拓扑的动态变化,链路断裂的自动修复以及感知数据的高速稳定传输。最后,感知数据通过簇首节点汇聚到网关,并通过内嵌到网关中的嵌入式 web 服务器向外界用户提供 web 浏览服务,以实现环境信息的远程监测。

2 IPv6 WSN 系统设计与实现

2.1 系统功能概述

系统功能可分为四个部分:簇内节点采集模块的

设计、感知数据接入模块的设计、簇首节点路由协议的设计以及嵌入式 web 服务器的设计。

簇内节点采集模块内嵌在簇内节点内部,用于对环境变化的实时监测。感知数据接入模块内嵌在簇内节点和簇首节点内部,实现了簇内节点加入簇首节点的过程以及簇内节点与簇首节点之间的信息交互。簇首节点路由协议内嵌在簇首节点和网关中,实现了簇首节点之间路由的建立以及对大量感知数据的高速远距离传输。嵌入式 web 服务器内嵌在网关中,支持多种客户端远程访问网关服务器,以实现传感器网络的实时监测。

2.2 簇内节点采集模块设计

簇内节点采集模块作为系统的最底层,实现对环境信息的实时监测。簇内节点中的 Contiki 操作系统含有完整的网络协议栈以及设备驱动程序,可以识别多种硬件平台的传感器节点。簇内节点嵌有光强传感器和温度传感器,通过 ADC (Analog-to-Digital Converter, 模/数转换器) 周期性采集光强和温度数据信息。

2.3 感知数据接入模块设计

感知数据接入模块实现簇内节点加入簇首节点的过程以及簇内节点和簇首节点之间的信息交互。

由于基于 Contiki 操作系统的簇内节点并没有一个完整的全球单播 IPv6 地址,只有一个 48/64 (48 位地址需通过 EUI-64 算法转换成 64 位地址) 的 MAC 地址。因此,为了使簇内节点能够拥有一个完整的全球单播 IPv6 地址,簇首节点在 Linux 操作系统中添加 RADVD (Router Advertisement Daemon, 路由通告) 模块和收发模块。RADVD 模块引入 RADVD 路由机制,此机制一方面可以实现向外广播路由通告,告知网络中的主机自身是个路由器;另一方面可以实现向网络中的主机进行地址前缀的广播。RADVD 模块引入 RADVD 机制的地址前缀广播功能并通过配置相关文件进行功能实现。收发模块则用于实现簇首节点对基于 802.15.4 协议数据包的解析和组装。

簇内节点通过收发模块接收簇首节点广播的地址前缀,并通过 Contiki 操作系统调用地址重组模块进行地址重组,将簇首节点广播的 64 位地址前缀和自身持有的 64 位 MAC 地址相结合,获得一个完整的全球单播 IPv6 地址,从而能与簇首节点进行通信,实现加入簇的过程。

此后,簇首节点中的 Contiki 操作系统通过光强传感器和温度传感器的中断触发,将采集到的数据信息提交给网络协议栈,并通过多线程、事件触发等机制的处理,最终形成一个完整的 UDP 数据包并通过单跳或者多跳方式发送给簇首节点。

2.4 簇首节点路由协议的设计

簇首节点之间通过基于 IPv6 的 AODV 路由协议以自组织多跳的形式实现大量感知数据的统一传输。该设计的主要设计任务包括:无线网卡的配置、基于 IPv6 的 AODV 路由协议的实现以及网关中解封功能的实现。

2.4.1 无线网卡的配置

簇首节点之间通过基于 802.11g 协议的无线网卡实现数据的长距离传输。本系统采用的是 rt73 无线网卡,它通过 usb 接口外接到簇首节点上。为了使簇首节点能够支持无线网卡的运行,需要修改驱动源代码,并重新配置编译 Linux 内核生成驱动模块。此外,还需对无线网卡进行相关配置,包括设置其 IPv6 地址、工作模式、essid 以及信道等。

2.4.2 基于 IPv6 的 AODV 协议实现

AODV 协议^[13-14]是由 IETF 工作组提出的一种按需驱动的路由协议,它是 Ad-hoc 网络中的主流协议之一。在 AODV 协议中,每个节点都定期地向邻居广播 Hello 消息,以确定自己的邻居节点并将其加入到自己的路由表中。当源节点需要和目的节点进行通信时,首先需要查询自己的路由表,如果没有相应的路由条目时,源节点将发起路由请求 RREQ,RREQ 逐跳广播。当目的节点收到 RREQ 后,会按照原路向源节点返回 RREP 消息。如果邻居节点收到 RREQ,首先查询自己的路由表,如果发现有对应目的节点的路由表项,则也会向源节点返回 RREP 消息,来确定路由的可用性。当链路发生断裂时,节点会向上游节点发送 RERR 消息,用来维持链路的连通性。

AODV 协议已存在多个开源代码,其中以 aodv-uu-0.9.5 为代表,但它们都是基于 IPv4 协议实现的,并不支持 IPv6 协议。虽然 aodv-uu-0.9.5 存在支持 IPv6 协议的补丁,但都是基于 Linux 2.4 内核版本进行开发,与现有主流的 Linux 2.6 内核在机制、架构和内核模块实现上存在较大差异。因此,需要针对这种差异进行修改,满足 IPv6 在 AODV 协议中正常运行。

由于 AODV 代码中支持的是 IPv6 站点本地地址,其相当于 IPv4 中的私有地址,并不支持 IPv6 全球单播地址,所以数据包中的源目的地址并不能够被 Linux 内核中的 AODV 协议识别,也就不能对其进行路由转发。为了解决这一问题,需对原有的数据包进行封装。在数据包的 IPv6 头部后面增添封装部分,将原目的地址和原协议类型添加进去,同时为 IPv6 头部设置新的目的地址以及自定义协议类型,其中新的目的地址是能在 AODV 协议中进行路由转发的网关站点本地地址,而自定义协议类型则用于网关对 AODV 数据包的识别。

基于 IPv6 的 AODV 协议实现由两部分组成:内核空间的实现和用户空间的实现。内核空间主要用于对数据包的获取、分析以及路由转发,同时可以根据用户空间的信息实时更新内核路由表;用户空间则用于进行 AODV 算法的实现,包括定期广播 Hello 消息,发送 RREQ 消息、接收 RREP 消息以及发送 RERR 消息,用以实现路由查找机制。内核空间 and 用户空间通过 Netlink 套接口实现数据包的彼此传递,如图 2 所示。

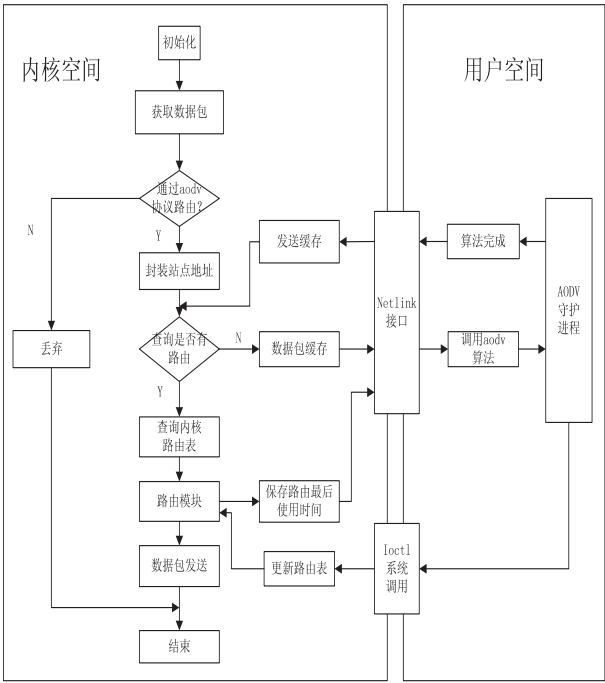


图 2 基于 IPv6 的 AODV 模块工作流程

2.4.3 网关中解封功能的实现

基于 IPv6 的 AODV 协议在网关中的实现不同于簇首节点,其不但包含了簇首的全部功能,另外还需添加网关的解封功能。由于簇首节点将数据包中的目的地址都设置为网关的站点本地地址,所以数据包均会送达到网关。网关收到封装好的数据包后,首先判断数据包中的协议类型是不是设置好的自定义协议类型,如果是自定义协议类型,则证明该数据包是通过 AODV 协议发来的,需要对其进行解封,如果不是自定义协议类型,则进行丢弃。解封过程是封装的逆过程,将 IPv6 头部中的目的地址字段和协议类型字段按照原有的值进行相应配置,并去掉封装部分,恢复成最初的数据包。

2.5 嵌入式 web 服务器的设计

在网关本地搭建嵌入式 web 服务器,可以大大增加客户终端远程访问传感器网络的灵活性,既可以通过以太网口实现 PC 机的访问,也可以通过 WIFI 接口实现手机的访问。本系统通过 PC 机访问嵌入式 web 服务器。

嵌入式 web 服务器一方面通过对数据包的获取分

析,判断数据包是否是感知数据,并通过 Netlink 接口与用户空间进行交互,利用计时器将感知数据周期性生成 XML 文件;另一方面,网关嵌入式 web 服务器利用 CGI 程序对用户的合法性进行判断,之后通过 Javascript 周期性解析已生成的 XML 文件,并以数据表格形式显示数据信息,同时采用 VML 语言以曲线的形式动态显示数据。工作流程如图 3 所示。

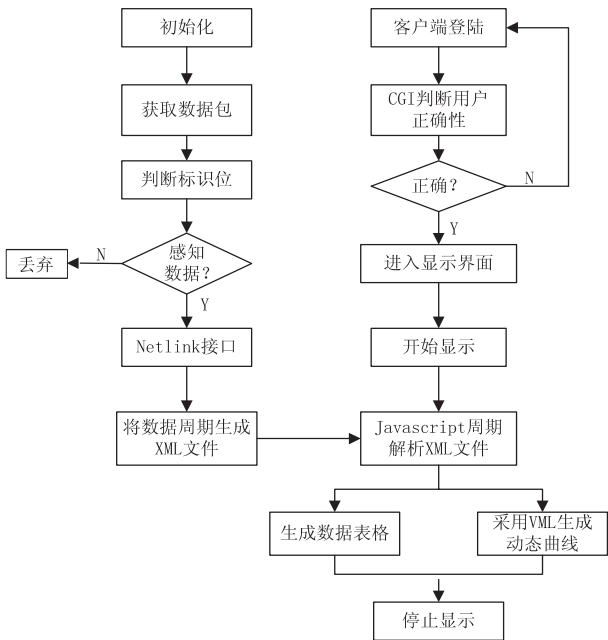


图 3 嵌入式 web 服务器工作流程

3 系统测试

为了验证系统的可行性,文中搭建了如图 4 所示的测试环境。其中簇内节点采用的是基于 Contiki 操作系统的 IPv6 微型传感器节点;A、B、C 为簇首节点, D 为网关,采用的是基于 Linux 操作系统的 ARM 硬件平台;客户端为 PC 机。

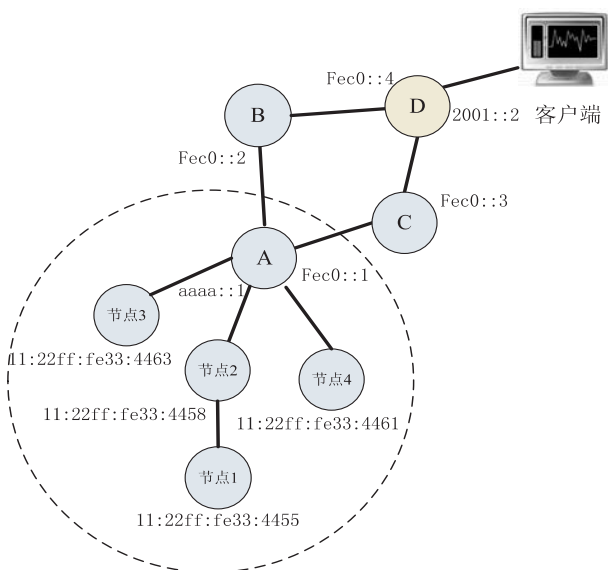


图 4 系统功能测试环境

簇内节点由于只有 64 位 MAC 地址,无法与外界进行通信,需要簇首节点通过 RADVD 机制进行地址前缀的广播。传感器节点收到 64 位地址前缀后与自己的 MAC 地址组合成 128 位的全球单播地址,方能与外界进行通信。簇首节点 A 广播 64 位地址前缀 aaaa::,传感器节点收到后与自己的 64 位 MAC 地址组装成 IPv6 全球单播地址,实现加入簇的过程,并与簇首节点 A 进行通信。

基于 IPv6 的 AODV 路由模块通过 AODV 协议实现簇首节点的数据多跳传输。为了测试 AODV 协议的邻居交互功能,簇首节点 A 和网关分别利用 ip6table 命令将对方的 MAC 地址放到自己的禁止通信列表中,二者之间不能实现直接通信,因此簇首节点 A 需要发送 Hello 消息寻找邻居节点。

为了测试 AODV 的多跳和封装功能,感知数据包的目的地址被设置为网关的以太网口地址 2001::2。如图 5 所示,簇首节点 A 为了把传感器数据送达到网关以太网口地址 2001::2 处,首先将数据包目的地址封装成网关的站点本地地址 fec0::4,并通过下一条地址 fec0::2 发送到网关,实现了数据包的封装以及多跳传输。同时,簇首节点 A 也增加路由条目,指明到目的地址 2001::2 需要通过封装地址 fec0::4 来传达。

```
#tail -f nohup.out
00:11:01.652 k_add_rte: Adding route: krt_dst:fec0:0:0:0:0:0:4, krt_gtw:fec0:0:0:0:0:0:2
00:11:01.652 iplib_k_route_setup: setup_route: rte.rt_dst:fec0:0:0:0:0:0:4,rte.rt_gateway:
fec0:0:0:0:0:0:2
00:11:01.653 rt_table_update: Added kernel route for expired fec0:0:0:0:0:0:4
00:11:01.653 nl_send_add_route_msg: Send ADD/UPDATE ROUTE to kernel: fec0:0:0:0:0:0:4 via
fec0:0:0:0:0:0:2
00:11:01.653 k_add_rte: Add route: 2001:0:0:0:0:0:2 via fec0:0:0:0:0:0:4
```

图 5 基于 IPv6 的 AODV 路由模块
多跳和封装功能测试

嵌入式 web 服务器模块实现了感知数据在浏览器上的动态显示。演示界面一方面以表格形式显示数据信息,包括 ID 号、地址信息以及采集的数据信息,另一方面以曲线形式显示光强和温度的动态数据信息。

4 结束语

随着无线传感器网络的应用越来越广泛,传感器节点的大规模部署也越发重要。为此,文中设计了基于异构分簇机制的 IPv6 WSN 系统架构,分析了系统中的关键技术及各功能实体的具体实现。本系统具有较好的应用性和扩展性,可部署在楼宇等大规模应用中。

参考文献:
[1] 孙利民,李建中.无线传感器网络[M].北京:清华大学出
(下转第 154 页)

码的 Agent2D-EX 与其各进行了 30 场比赛,比赛结果如表 2 所示。

表 2 与 A 队的比赛结果

	胜负	得失球	净胜球
Agent2D	2:28	14:60	-46
Agent2D-EX	27:3	78:10	68

表 2 比赛的数据表明,加入了动态角色互换的 Agent2D-EX 对 A 队有明显优势。

使用静态异构去分配角色,限制了角色的转换,不能体现球员的灵活性,效率比较差^[11]。通过在线教练动态的角色互换,实现了动态的更换角色后,提高了球队队员的适应性与灵活性^[12];对于攻守不平衡的球队来说,一场比赛下来可能前锋体能已经消耗殆尽,而后卫仍然保持着很好的体能。对于这种情况,同样通过动态转换角色来很好地协调每个角色的体能,同时实现了攻防转换;对于开发者来说,不再是传统的考虑号码属性来写决策,而是真正实现通过统一的调用方法对球员角色属性去写决策。

4 结束语

多 Agent 协同技术在 RoboCup 中有了较为成熟的应用,但是还有很多问题亟待解决,应该进一步深入的探索,以仿真平台作为测试对象,理论联系实际。进一步的工作将收敛压迫式进攻、对方阵形在线学习的思想应用到球队中去,最终实现多智能体协同技术的进一步发展。

参考文献:

[1] 郭 博,程家兴,张大强. 非通讯多 Agent 协作在 RoboCup 中的应用[J]. 计算机技术与发展,2006,16(4):90-92.

[2] Stone P, Veloso M. Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective [J]. Automous Robots, 2000, 8 (3):345-383.

[3] 谢 雅. RoboCup 中多智能体协作规划的研究及应用 [D]. 长沙:中南大学,2006.

[4] 柯立堃. 基于阵形和角色的多 Agent 协作研究和战术库的设计 [D]. 合肥:安徽大学,2007.

[5] 刘 巍,张 承,马辰威,等. 机器人足球决策及角色分配系统[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(7):966-968.

[6] 方宝富,王 浩. 机器人足球仿真[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2011.

[7] 闵华清,范耀军. 基于多 Agent 的 RoboCup 仿真足球比赛通信[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32 (Sup):157-160.

[8] 赵 丽,董红斌. 多 Agent 系统在 RoboCup 中的应用[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报,2005,21(2):40-45.

[9] 耿丽娜. RoboCup 仿真组教练模型研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003.

[10] Kok J R, Spaan M T J, Vlassis N. Non-communicative multi-robot coordination in dynamic environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 50(2-3):99-114.

[11] 廖本先. RoboCup2D 比赛仿真机器人足球队的建设 [D]. 广州:广东工业大学,2010.

[12] Sandholm T W, Lesser V R. Coalitions among Computationally Bounded Agents [J]. Artificial Intelligence, 1997, 94(1-2):99-137.

(上接第 150 页)

版社,2005.

[2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12):2292-2330.

[3] 张宏科,梁露露,高德云. IPv6 无线传感器网络的研究及其应用[J]. 中兴通信技术,2009,15(5):37-40.

[4] Xiong Wei, Liu Jianfu, Zhang Guodong. Applications of web technology in wireless sensor network[C]//Proc. of 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology. Chengdu:IEEE,2010:227-230.

[5] Yan Hairong, Xu Youzhi, Gidlund M. Experimental e-Health Applications in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Kunming, Yunnan:IEEE,2009:563-567.

[6] 孙利民,刘 伟. 对大规模传感器网络应用面临问题的思考[J]. 中兴通讯技术,2012,18(2):10-14.

[7] 韩双霞,范一鸣,张 露,等. 大规模 WSN 的三层拓扑架构及其拓扑控制[J]. 计算机应用,2009,29(6):1523-1526.

[8] 张兴强,扬科华,罗 娟. 一种异构传感器网络下的节能分

簇路由算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(11):81-83.

[9] 张玺栋,康桂霞,张 平,等. 基于博弈的大规模无线传感器网络分簇算法[J]. 电子与信息学报,2011,33(10):2516-2520.

[10] Farooq M O, Kunz T. Operating Systems for Wireless Sensor Networks: A Suevey[J]. Sensors, 2011, 11(6):5900-5930.

[11] Dunkels A, Gronvall B, Voigt T. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors [C]//Proc. of 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. [s. l.]:[s. n.],2004:455-462.

[12] Oikonomou G, Phillips I. Experiences from porting the Contiki operating system to a popular hardware platform[C]//Proc. of 2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops. [s. l.]:[s. n.],2011:1-6.

[13] 程 林,陈福生. 无线 Ad_hoc 网络路由协议的分析比较 [J]. 计算机工程与应用,2004(22):143-149.

[14] 庄春梅,陆建德. AODV 协议分析及过期路由维护机制改进[J]. 计算机技术与发展,2009,19(7):44-47.

基于异构分簇机制的IPv6 WSN系统设计与实现

作者：

[常英亮](#)，[秦雅娟](#)，[高德云](#)，[张琳娟](#)，[CHANG Ying-liang](#)，[QIN Ya-juan](#)，[GAO De-yun](#)，[ZHANG Lin-juan](#)

作者单位：

[北京交通大学 电子信息工程学院, 北京, 100044](#)

刊名：

[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

ISTIC

[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：

[2013\(9\)](#)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201309037.aspx