



中南财经政法大学
青|年|学|术|文|库

无线传感器网络数据融合 与路由的研究

万少华 著

中国社会科学出版社



中南财经政法大学
青|年|学|术|文|库

无线传感器网络数据融合 与路由的研究

万少华 著

中国社会科学出版社

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络数据融合与路由的研究 / 万少华著. —北京: 中国社会科学出版社, 2015. 1

(中南财经政法大学青年学术文库)

ISBN 978 - 7 - 5161 - 5669 - 8

I. ①无… II. ①万… III. ①无线电通信 - 传感器 - 数据融合 - 研究
②无线电通信 - 传感器 - 路由选择 - 研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 041711 号

出 版 人 赵剑英

责任编辑 田 文

特约编辑 李 华

责任校对 张爱华

责任印制 王 磊

出 版

社 址 北京万寿路大街甲 158 号

邮 编 100720

网 址 <http://www.csspw.cn>

发 行 部 010 - 84083685

门 市 部 010 - 84029450

经 销 新华书店及其他书店

印 刷 北京君升印刷有限公司

装 订 廊坊市广阳区广增装订厂

版 次 2015 年 1 月第 1 版

印 次 2015 年 1 月第 1 次印刷

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 9.5

插 页 2

字 数 161 千字

定 价 30.00 元

凡购买中国社会科学出版社图书, 如有质量问题请与本社联系调换

电话: 010 - 84083683

版权所有 侵权必究

《中南财经政法大学青年学术文库》

编辑委员会

主 任：吴汉东

副主任：郭道扬

委 员：王金秀

朱新蓉

李道荣

徐双敏

董邦俊

主 编：杨灿明

杨灿明

刘后振

许家林

苏少之

曹新明

姚 莉

刘胜湘

张新国

陈景良

黄志伟

向书坚

李剑波

胡贤鑫

葛翔宇

总 序

一个没有思想活动和缺乏学术氛围的大学校园，哪怕它在物质上再美丽、再现代，在精神上也是荒凉和贫瘠的。欧洲历史上最早的大学就是源于学术。大学与学术的关联不仅体现在字面上，更重要的是，思想与学术，可谓大学的生命力与活力之源。

中南财经政法大学是一所学术气氛浓郁的财经政法高等学府。范文澜、嵇文甫、潘梓年、马哲民等一代学术宗师播撒的学术火种，五十多年来一代代薪火相传。在世纪之交，在合并组建新校而揭开学校发展新的历史篇章的时候，学校确立了“学术兴校，科研强校”的发展战略。这不仅是对学校五十多年学术文化与学术传统的历史性传承，而且是谱写新世纪学校发展新篇章的战略性手笔。

“学术兴校，科研强校”的“兴”与“强”，是奋斗目标，更是奋斗过程。我们是目的论与过程论的统一论者。我们将对宏伟目标的追求过程寓于脚踏实地的奋斗过程之中。由学校斥资资助出版《中南财经政法大学青年学术文库》，就是学校采取的具体举措之一。

本文库的指导思想或学术旨趣，首先，在于推出学术精品。通过资助出版学术精品，形成精品学术成果的园地，培育精品意识和精品氛围，提高学术成果的质量和水平，为繁荣国家财经、政法、管理以及人文科学研究，解决党和国家面临的重大经济、社会问题，作出我校应有的贡献。其次，培养学术队伍，特别是通过对一批处在“成长期”的中青年学术骨干的成果予以资助推出，促进学术梯队的建设，提高学术队伍的实力与水平。最后，培育学术特色。通过资助在学术思想、学术方法以及学术见解等方面有独到和创新之处的成果，培育科研特色，力争通过努力，形成有我校特色的学术流派与学术思想体系。因此，本文库重点面向中青年，重

点面向精品，重点面向原创性学术专著。

春华秋实。让我们共同来精心耕种文库这块学术园地，让学术果实挂满枝头，让思想之花满园飘香。



2009 年 10 月

Preface

A university campus, if it holds no intellectual activities or possesses no academic atmosphere, no matter how physically beautiful or modern it is, it would be spiritually desolate and barren. In fact, the earliest historical European universities started from academic learning. The relationship between a university and the academic learning cannot just be interpreted literally, but more importantly, it should be set on the ideas and academic learning which are the so – called sources of the energy and vitality of all universities.

Zhongnan University of Economics and Law is a high education institution which enjoys rich academic atmosphere. Having the academic germs seeded by such great masters as Fanwenlan, Jiwenfu, Panzinian and Mazhemin, generations of scholars and students in this university have been sharing the favorable academic atmosphere and making their own contributions to it, especially during the past fifty – five years. As a result, at the beginning of the new century when a new historical new page is turned over with the combination of Zhongnan University of Finance and Economics and Zhongnan University of Politics and Law, the newly established university has set its developing strategy as “Making the University Prosperous with Academic Learning; Strengthening the University with Scientific Research”, which is not only a historical inheritance of more than fifty years of academic culture and tradition, but also a strategic decision which is to lift our university onto a higher developing stage in the 21st century.

Our ultimate goal is to make the university prosperous and strong, even through our struggling process, in a greater sense. We tend to unify the destination and the process as to combine the pursuing process of our magnificent goal with the practical struggling process. The youth's Academic Library of Zhongnan University of Economics and Law, funded by the university, is one of our specif-

摘 要

无线传感器网络是由大量传感器节点组成,通过无线通信方式形成一个多跳自组织的网络系统,其目的是协作地监测、感知和采集网络覆盖区域内各种感知对象的信息,并通过该网络传送给汇聚节点。然而,由于无线传感器网络节点采用电池供电,并且不可补充,因此能量有限。另外节点的存储能力有限、计算能力有限、传输距离有限。这就使得能量问题一直以来成为无线传感器网络研究的关键性问题。路由机制从网络层决定了传感器节点采集的数据在整个网络传输的方式,简单、可靠、负载均衡成为高性能网络的重要指标。传感器网络内由于数据存在高度冗余,而进行数据融合可以减少网络中数据的传输量,从而最终降低网络的能量消耗。本书以能量消耗为主线,以延长传感器网络的生命周期为目标,围绕无线传感器网络的数据融合与数据路由展开研究,主要包括以下几个方面的研究内容:

1. 分析了无线传感器网络的能量消耗分布及节点功耗降低的设计技术,为全文基于节能技术的研究奠定了理论基础;介绍了无线传感器网络的 OSI 分层,指出在各层协议中单独进行性能优化由于忽视了同一性能指标在网络协议之间可能存在的相互依赖性,因此跨层优化是必由之路。由于传感器网络的高度应用相关性,我们也讨论了学术界当前比较经典的路由协议算法。

2. 进行数据融合,我们获得了节省能量的性能增益,但同时也带来结果延迟的弊端。就出现的比较有代表性的数据融合算法进行仿真实验,包括簇结构 (LEACH)、链式结构 (PEGASIS)、树结构 (Tributaries and Deltas) 以及相对无结构算法 (Synopsis Diffusion、Sweep),并比较其性能优劣。

3. 提出了一种能耗均衡的树根节点分解成多棵子树算法,在我们的仿真实验中,我们只对树根节点进行分解,而且仅限于汇聚节点在查询区域

外面的情况进行讨论，实际应用中，这种情况也是观察者最感兴趣的。有效地避免了树拓扑结构中，根节点周围由于负载较重，形成热区，能量消耗过快而失败直至网络拓扑分割。仿真实验证明了特别是对连续查询 (continuous query) 应用，根节点分解算法相比于单棵树性能有很大提高。

4. 基于树拓扑 SPT 结构与 MST 结构，分析了数据融合中存在的通信能耗及计算处理能耗，指出了很多学者在进行数据融合时，最大限度地减小网络中数据流量，然而却忽略了进行数据融合带来的计算能耗。特别是在视频、流媒体、图像等大型数据应用中，进行融合计算需要消耗相当一部分能量。因此本章通过网络模型、流量模型及感知数据之间的熵模型，从理论上探讨了使得网络中总能耗最小时，树拓扑 SPT 结构与 MST 结构之间的能耗权衡关系及相关影响因素。这一研究是重要的，对于研究人员面临具体的源节点数据相关性，如何选择不同的路由机制、选择哪个节点融合处理以及如何选择融合参数，比如：源节点数，通信半径等从而使得整个能耗最小提供了重要的指导依据。

5. 就给定的一对节点 (source-sink)，提出了一种基于负载均衡的多路径路由算法。我们研究了两种将数据包分配到不同路径的策略，一是 K 条路径同时传递数据，每条路径选择的概率均等 (multipath routing 1)；二是路径被选中的概率与其长度成反比 (multipath routing 2)。仿真实验的结果表明，无论是就负载均衡、QoS (Quality of Service) 还是生命周期，提出的 K 多路径路由算法都无可争议地优于最短路径路由 (the shortest path routing 又称 optimal routing)。

关键词：无线传感器网络；数据融合；多路径路由；负载均衡；生命周期

Abstract

A wireless sensor network usually consists of tens to thousands of nodes that communicate through wireless channels for information sharing and cooperative processing. After the initial deployment, sensor nodes are responsible for self-organizing an appropriate network infrastructure, often with multi-hop connections between nodes. The sensors start collecting information about the monitoring environment and finally the gathered results from the across WSNs can be shipped to the sink node. However, since sensor nodes are usually powered by batteries, efficient use of the limited amount of the available energy is a critical concern. Moreover, the memory, the capability of processor and the transmission range are also limited. Routing mechanism of networking layer has decided the way that the gathering information transmits in the entire network and the simplicity, robustness and load balancing become the important metrics of high performance network. There is a highly redundant data in WSNs, and data aggregation can reduce the amount of data transmission, thereby ultimately decreasing energy consumption. In this dissertation, we mainly study the data aggregation and routing and the energy consumption runs through all the paper for the purpose of extending the lifetime of the network. We develop in the dissertation as follows:

1. we analysis the nodes' energy consumption distribution of WSNs, which lays the theoretic basis of the whole dissertation research on the energy conservation. Then we introduce OSI layers and point out that cross-layer optimization is the right way we must take because performance optimization in a layer has neglected the fact that a performance metric is mutual dependent between the layers. We also discuss the typical routing protocol algorithm as a result of high application relevance.

2. We obtain the energy gain through data aggregation, but it results in end-to-end delay. We compare the following performance of the algorithms, such as LEACH, PEGASIS, Tributaries and Deltas, Synopsis Diffusion and Sweep.

3. We design and implement a tree-based routing algorithm that allows a user to gather aggregated information from individual sensor node's readings in a large-scale sensor network setting. Obviously, the nodes near the roots of the tree-structures, which are called "hot spots", will quickly deplete the sensor nodes' energy and dramatically shorten the network lifetime. Hence, we have implemented the split-tree mechanism for the purpose of prolonging the operational lifetime of the nodes, by means of splitting and pushing inwards the root of the tree that can be used concurrently providing the same spatial coverage for a given query-region, however, yielding better energy consumption than a single tree. The experimental results also demonstrate our designed mechanism can significantly prolong the sensor network lifetime, especially for the application of the continuous query.

4. Based on the SPT and MST structure, we point out performing data aggregation has also an energy cost comparable to that of wireless communication, especially for intensive applications with heavy data flow (including streaming media, video surveillance, and image-based tracking). But very few previous papers have explored the tradeoffs between computation and communication for data aggregation. Therefore, we study the problem of constructing a data aggregation tree spanning a set of source nodes, and determining the flow from each source node to the sink, with the goal of minimizing the sum of both computation and communication energy costs over all nodes in the tree by means of network model, the optimal flow model and entropy model.

5. Finally, we present a novel load-balancing mechanism of k-multipath routing algorithm that allows a given source node send samples of data to a given sink node in a large scale sensor networks. We study two different ways to use the multiple paths. In one method, called multipath routing 1, we choose a path randomly from the multiple paths with the same probability. The other method, called multipath routing 2, is to choose a path with a probability inversely proportional to the length of the path. The simulation results reveal that our multipath routing approach does not surprisingly perform better than the shortest path routing.

Key words: Wireless Sensor Network, data aggregation, multipath routing, load balancing, lifetime

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 无线传感器网络概述	(1)
一 什么是无线传感器网络	(1)
二 无线传感器网络的体系结构	(2)
三 无线传感器网络的特征及应用	(3)
第二节 无线传感器网络的研究热点与其挑战	(6)
第三节 研究动机	(8)
第四节 本书主要贡献	(8)
第五节 本书主要组织结构	(9)
第二章 无线传感器网络中能量高效的协议设计	(11)
第一节 无线传感器网络的能量消耗及降低功耗技术	(12)
一 无线传感器网络能量消耗分布	(12)
二 降低通信模块中节点的功耗技术	(13)
第二节 传感器网络 OSI 分层及跨层化设计思路	(17)
一 物理层	(18)
二 数据链路层	(19)
三 网络层	(21)
四 应用层	(22)
五 基于能量效率的跨层优化思路	(22)
第三节 无线传感器网络路由协议	(26)
一 以数据为中心的路由协议	(26)
二 层次型路由协议	(29)
三 基于地理位置的协议	(31)
四 可靠路由以及能量感知路由协议	(31)
五 传感器网络路由协议的比较	(33)

第四节 无线传感器网络提高能量效率的关键技术	(34)
一 睡眠机制	(34)
二 功率控制机制	(35)
三 数据融合机制	(36)
四 能量高效路由机制	(37)
第五节 本章小结	(37)
第三章 基于树结构的数据融合算法研究	(39)
第一节 数据融合的意义	(39)
第二节 数据融合的相关工作	(41)
一 数据融合的国内外研究现状	(41)
二 数据融合的分类	(45)
三 网络层中的数据融合	(45)
四 数据融合树的构造	(47)
第三节 几种典型拓扑结构数据融合算法比较	(48)
一 性能参数	(48)
二 算法描述	(49)
三 仿真实验及分析	(53)
第四节 一种树根节点分解成多棵子树的算法研究	(54)
一 问题的提出	(54)
二 相关工作	(55)
三 算法描述	(57)
四 仿真实验及分析	(61)
第五节 理论分析	(62)
第六节 本章小结	(64)
第四章 最小能耗数据融合路由问题研究	(66)
第一节 问题的提出及相关工作	(66)
一 问题的提出	(66)
二 相关工作	(67)
第二节 网络模型及问题的形式化定义	(69)
一 网络模型	(69)
二 问题的形式化定义	(70)
第三节 给定树的最佳流量分析	(74)

一	例子分析	(74)
二	决定最佳流量	(75)
第四节	SPT 以及 MST 树分析比较	(77)
一	基于网格拓扑的分析比较	(77)
二	SPT 与 MST 结构之间的权衡	(80)
三	本节结语	(82)
第五节	仿真实验及分析	(82)
一	仿真实验环境及分析	(82)
二	源节点个数对性能影响	(83)
三	通信半径对性能的影响	(83)
第六节	本章小结	(83)
第五章	一种基于负载均衡的 K 多路径路由协议研究	(84)
第一节	查询模型以及问题的提出	(84)
一	查询模型	(84)
二	问题的提出	(85)
第二节	相关工作	(86)
一	多路径路由的优点	(86)
二	多路径路由分类	(87)
三	多路径路由国内外研究现状	(89)
第三节	K 多路径路由算法描述	(92)
第四节	仿真实验以及分析	(94)
第五节	本章小结	(101)
第六章	结束语	(102)
第一节	研究总结	(102)
第二节	研究展望	(103)
一	研究目的、意义	(104)
二	研究内容及实现方案	(106)
参考文献		(115)
附录	仿真软件简介	(129)
后记		(134)

图表索引

图 1-1	无线传感器网络体系结构	(3)
图 1-2	无线传感器网络节点结构	(3)
图 2-1	无线传感器网络能量消耗模型	(13)
图 2-2	传递 1bit 的数据能量与延迟之间的关系	(15)
图 2-3	传感器网络协议栈体系结构	(18)
表 2-1	跨层优化技术及相关的权衡	(26)
图 2-4	SPIN 路由协议建立与消息传递机制	(27)
图 2-5	定向扩散协议	(28)
表 2-2	路由协议特点比较	(33)
图 3-1	数据融合根据与网络层的关系分类	(46)
图 3-2	基于融合树的数据路由图	(47)
图 3-3	汇聚节点与传感器网络查询区域的关系	(48)
图 3-4	Tributaries and Deltas	(51)
图 3-5	六种算法的生命周期比较	(54)
图 3-6	汇聚节点位于查询区域里面	(56)
图 3-7	汇聚节点位于查询区域外面	(56)
图 3-8	逻辑树结构	(59)
图 3-9	融合树构造与数据收集示意图	(59)
图 3-10	根节点分解示意图	(60)
图 3-11	树根节点与汇聚节点通过单一树路由仿真图	(60)
图 3-12	单一树与分解树的能量消耗	(62)
图 3-13	单一树与分解树就不同的生命周期定义比较	(62)
图 3-14	数据融合下延迟与通信半径的关系	(64)
图 3-15	数据融合下延迟与采集范围的关系	(64)
表 4-1	网络模型符号列表	(69)

图 4-1	能量消耗与流量的关系	(71)
图 4-2	数据融合树以及融合路由的示意图	(73)
表 4-2	不同条件下的最佳流量	(75)
图 4-3	例子中流量 f^s 与 γ 的关系	(77)
图 4-4	网格状拓扑结构中 SPT 与 MST 路由机制	(78)
图 4-5	ε_{SPT} 分解图	(78)
图 4-6	熵模型	(81)
图 5-1	传感器网络查询区域根节点与汇聚节点之间构建点对点最 短路由	(86)
图 5-2	路由分类	(88)
图 5-3	K 多路径路由模型	(94)
图 5-4	节点的负载分布与其到网络中心距离关系图	(96)
图 5-5	端对端的平均延迟与采集频率变化的关系	(97)
图 5-6	数据包传送成功率与采集频率间隔的关系	(98)
图 5-7	能量消耗随运行时间的关系	(99)
图 5-8	不同路由策略之间的生命周期对比	(100)
图 5-9	energy $\times$ delay 与传送数据包之间的关系	(100)
图 6-1	传感器网络在 sink 节点感知查询区域数据拓扑图	(107)
图 6-2	Bezier 曲线路由	(108)
图 6-3	利用 3 个控制点构建 Bezier 曲线	(110)
图 6-4	两种查询区域划分方法	(111)
图 6-5	基于空间的机会主义数据融合路由	(112)
图 6-6	来自节点 D、A 的数据包在时间上不可能融合	(113)

第一章 绪论

第一节 无线传感器网络概述

一 什么是无线传感器网络

1988 年 Mark Weiser 提出“Ubiquitous Computing（缩写为 Ubicomp 或 UC）”的概念，即“普适计算”（Pervasive Computing）后，在普适计算思想的催生下，计算、通信和传感器三项技术得以交叉应用，无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSNs）正是这三项技术相结合的产物。那么什么是无线传感器网络呢？无线传感器网络是由成千上万的传感器节点组成，这些节点采集观测区域的物理现象，它们通过无线信道通信实现信息共享与合作处理，并将观测区域采集的结果通过多跳传送到观察者。传感器网络在任何恶劣环境下都能采集到大量翔实的信息，因此真正实现了“无处不在的计算”理念。

微机电系统（Micro-Electro-Mechanism System, MEMS）技术、无线通信技术和电子技术的快速发展，使得由低成本、低功耗、多功能、体积小、可进行短距离通信的传感器构建低成本的无线传感器网络的开发和广泛应用成为可能。各种各样的传感器节点能采集观测区域热、光、声音、速度、地震波以及图像等信号，从而能够监控到包括温度、物种、气候变化、压力、移动物体大小、方向、速度等众多物理现象，并通过无线通信把采集的信息传递给用户^①。互联网构成了逻辑上的信息世界，而传感器网络把我们连接信息空间的网络向物理世界延伸，建立了物理世界与信息世界的一个桥梁，从而拓展了人类认识自然改造自然的能力。

无线传感器网络是信息感知和采集领域的一场深刻变革，将给人类的

^① 孙利民、李建中、陈渝等：《无线传感器网络》，清华大学出版社 2005 年版，第 16—36 页。
崔莉、鞠海玲、苗勇：《无线传感器网络研究进展》，《计算机研究与发展》2005 年第 42（1）期，第 163—174 页。