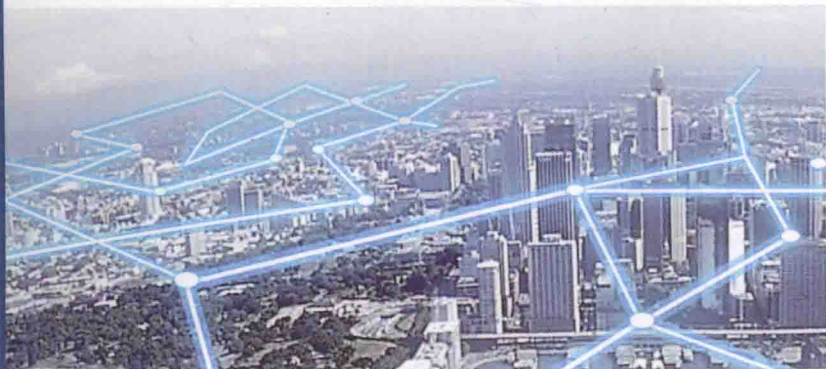


NETWORK TOPOLOGY CONTROL ALGORITHMS AND SIMULATIONS



网络拓扑结构控制 算法与仿真

李志华 著



江西人民出版社
Jiangxi People's Publishing House
全国百佳出版社



NETWORK TOPOLOGY CONTROL ALGORITHMS AND
SIMULATIONS

网络拓扑结构控制 算法与仿真

李志华 著



江西人民出版社
Jiangxi People's Publishing House
全国百佳出版社

图书在版编目(CIP)数据

网络拓扑结构控制算法与仿真 / 李志华著. —南昌:
江西人民出版社, 2015.12
ISBN 978-7-210-08158-6

I. ①非… II. ①李… III. ①网络拓扑结构 IV.
①TP393.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 304766 号

网络拓扑结构控制算法与仿真

李志华 著

责任编辑:李月华 徐 旻

出 版:江西人民出版社

发 行:各地新华书店

地 址:江西省南昌市三经路 47 号附 1 号

发行部电话:0791-86898815

编辑部电话:0791-88629871

邮 编:330006

网 址:www.jxp-ph.com

E-mail:jxp-ph@tom.com web@jxp-ph.com

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张:20

字 数:250 千字

ISBN 978-7-210-08158-6

赣版权登字-01-2015-897

版权所有 侵权必究

定 价:48.00 元

承 印 厂:江西新华印刷集团有限公司

赣人版图书凡属印刷、装订错误,请随时向承印厂调换

前 言

大数据、云计算技术为“互联网+”插上了腾飞的翅膀。

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)凭借其低成本、低功耗、分布式和自组织等特点,成为获取物理世界信息的重要手段。依赖无线传感器网络所感知的“时变数据”和“流变数据”是大数据(Big Data)的两种主要形式之一。无线传感器网络完全能够实现对物理世界有用信息的细粒度感知,可将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起,从而真正实现物理世界、计算世界和人类社会三元世界的统一,必将改变人类与自然界的交互方式。

但是无线传感器网络中传感器节点的资源受限问题却使无线传感器网络的研究和应用面临着巨大的挑战。无线传感器网络理论和技术研究的主要任务之一就是如何减少节点能量消耗、延长网络生存时间,其中无线传感器网络拓扑控制不仅是节点定位、路由设计等其他技术的基础,而且也是降低节点能耗、推迟网络死亡时间的重要技术支撑,成为无线传感器网络研究的热点和关键之一。

分簇技术是层次型网络拓扑结构控制的关键技术。层次型拓扑控制的主要思想是:当非簇头节点不需要进行信息接收和发送时,非簇头节点进入

睡眠状态,从而避免非簇头节点因空闲信号的监听而额外浪费能量,与此同时,簇头节点对所采集的信息进行聚合或融合处理并进行转发,为网络应用提供服务。层次型网络拓扑结构控制算法或技术首先通过分簇,将无线传感器网络中的传感器节点分为簇头节点和非簇头节点。簇头节点负责进行簇内成员的通信调度,以及簇内成员数据的处理和转发;非簇头节点负责进行物理世界的监测和数据感知。通常,簇头需要转发大量的数据,所以能量消耗比较快,因而在层次型网络拓扑结构控制算法中需要周期性地选择簇头,以起到均衡网络中节点能耗、延长网络生存时间的效果。层次型网络拓扑结构控制算法的优点有很多,比如有利于应用分布式算法,适合大规模网络;簇头可对数据进行融合,减少了数据通信量;大量非簇头节点长时间处于睡眠状态,减少了节点能量消耗;由于分簇机制,网络被划分成了众多区域,减少了簇间通信干扰等。

本书在对现有无线传感器网络拓扑控制算法进行分析的基础上,主要针对层次型拓扑结构控制算法进行研究。

虽然,网络拓扑结构控制的研究与应用在近年来得到了前所未有的快速发展。但是不论是网络拓扑结构控制技术、路由算法还是路由协议都需要进一步与人工智能、机器学习和高性能计算等学科领域相结合,特别是与这些前沿学科中出现的新理论和新技术紧密结合,形成学科交叉,应对大数据的挑战。

为了进一步推动无线传感器网络技术的发展,并反映该领域的最新研究成果,让相关专业的研究生、高年级本科生和工程技术人员比较深入地理解并快速掌握最底层的网络拓扑结构控制技术,特编写此书。本书撰写过程中融合了作者本人和作者所指导研究生在攻读学位期间所做的主要研究成果和近几年在无线传感器网络拓扑结构控制领域的研究工作,同时也吸纳了国内外具有代表性的研究成果。并且在撰写过程中,围绕网络拓扑结构控制这个主题,从不同角度进行展开,力求以点带面。

本书共分七章。第一章主要介绍无线传感器网络的组织结构和该领域中的热点和关键问题;第二章主要介绍了无线传感器网络拓扑结构控制的作用、意义以及拓扑结构控制算法设计的原则和要点;第三章主要介绍了基于能量的仿射传播聚类拓扑结构控制算法和多跳仿射传播聚类拓扑结构控制算法,并对他们进行了实验研究和分析;第四章主要介绍了基于能量等级的分簇拓扑结构控制算法和基于能量等级的多跳分簇拓扑结构控制算法,并对他们进行了应用研究和分析;第五章介绍了基于节点竞争力的网络分簇拓扑结构控制算法和基于节点竞争力的多跳网络分簇拓扑结构控制算法,并对算法在大规模无线传感器网络中的应用潜力进行了分析研究;第六章结合蚁群优化算法的研究,通过对蚁群算法进行改进,提出了基于改进蚁群的无线传感器网络路由算法,并同其他已有算法进行了比较分析;第七章介绍了父节点可控的分布式缠绕多路径路由算法,并对算法进行了综合评价和实验比较。最后给出了有关本书部分算法的关键实现代码作为附录。

感谢已毕业的研究生崔可想、陈孟涛、尹熙、李朋飞前期的辛勤积累,正是他们的努力工作才有了实验室今天的发展;感谢实验室的在读研究生刘庭绪、徐敏达、闫成雨、辛平、俞新荣、李贝贝等同学,他们有的同样做了大量的研究工作、有的做了大量的编辑排版工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者、同行和专家批评指正。

李志华

2015 年 10 月于江南大学

|目 录|

前 言	—	1
第一章 绪 论	—	1
1.1 引 言	—	1
1.2 无线传感器网络简介	—	2
1.2.1 基本介绍	—	2
1.2.2 无线传感器网络特点	—	4
1.2.3 无线传感器网络的关键技术	—	6
1.3 本章小结	—	9
参考文献	—	9
第二章 相关基础知识	—	15
2.1 引 言	—	15
2.2 网络拓扑控制的作用和意义	—	16
2.3 网络拓扑控制机制设计的目标和要素	—	18
2.4 网络拓扑控制机制研究的主要思路	—	20
2.5 经典网络拓扑控制算法和路由算法之分析和比较	—	22
2.5.1 拓扑控制算法比较	—	22
2.5.2 经典路由协议的比较与分析	—	23

2.6 相关基础算法简介	—	24
2.6.1 LEACH 算法	—	24
2.6.2 AP 算法	—	27
2.7 本章小结	—	31
参考文献	—	31
第三章 基于能量的 EBAPC 分簇网络拓扑控制算法	—	37
3.1 概 述	—	37
3.2 基于能量的分簇网络拓扑控制算法思路和策略	—	37
3.3 基于能量的 EBAPC 分簇网络拓扑控制算法	—	39
3.3.1 EBAPC 拓扑控制算法	—	39
3.3.2 仿真实验及其分析	—	42
3.4 多跳 EBAPC - M 网络拓扑控制算法	—	52
3.4.1 概 述	—	52
3.4.2 单跳分簇网络拓扑控制算法的分析	—	52
3.4.3 多跳 EBAPC - M 网络拓扑控制算法	—	56
3.5 面向大规模 WSNs 的 EBAPC 及 EBAPC - M 算法的 应用潜力分析	—	70
3.5.1 概 述	—	70
3.5.2 针对大规模网络的应用分析	—	70
3.6 本章小结	—	72
参考文献	—	73
第四章 基于能量等级的拓扑控制算法	—	75
4.1 概 述	—	75
4.2 ELBC 算法设计思想	—	76

4.2.1 能量等级	76
4.2.2 算法设计思想	77
4.2.3 ELBC 算法描述	78
4.2.4 仿真实验及其分析	81
4.3 基于能量等级的多跳拓扑控制算法	91
4.3.1 概 述	91
4.3.2 多跳传输的意义	92
4.3.3 基于能量等级的多跳拓扑控制算法 M - ELBC	94
4.3.4 改进的多跳拓扑控制算法 BM - ELBC	98
4.3.5 仿真实验及其分析	103
4.4 本章小结	110
参考文献	111
第五章 基于节点竞争力的网络分簇拓扑控制算法	113
5.1 概 述	113
5.2 APBCS 算法	114
5.2.1 算法模型	114
5.2.2 基于节点竞争力的网络分簇拓扑控制算法	115
5.2.3 仿真实验及分析	119
5.3 基于 APBCS 算法和混合粒子群成链的分簇路由协议	126
5.3.1 算法基础	126
5.3.2 簇间成链的研究	129
5.3.3 CRPBIC 分簇路由协议	133
5.3.4 仿真实验及分析	137

5.4	CRPBIC 协议在大规模无线传感器网络中的应用研究	146
5.4.1	算法基础	146
5.4.2	大规模场景下 CRPBIC 协议的应用研究	148
5.4.3	仿真实验及分析	153
5.5	本章小结	160
	参考文献	161
第六章	基于改进蚁群的 WSNs 路由算法	163
6.1	概述	163
6.2	MMAS 蚁群算法简介	164
6.3	基于混合行为的蚁群算法	167
6.3.1	HBAC 算法	167
6.3.2	实验结果和分析	171
6.4	基于改进蚁群算法的 WSNs 路由算法研究	174
6.4.1	引言	174
6.4.2	网络模型假设	175
6.4.3	基于改进蚁群的 WSNs 路由算法	176
6.4.4	实验结果和分析	182
6.5	本章小结	185
	参考文献	185
第七章	父节点可控的分布式缠绕多路径路由算法	187
7.1	概述	187
7.2	网络模型与假设	189
7.3	DPCBMR 算法	189

7.3.1 分层多父节点拓扑构建算法	— 190
7.3.2 最优父节点选择算法	— 193
7.3.3 协作式数据转发算法	— 195
7.4 算法分析	— 197
7.4.1 消息复杂度	— 197
7.4.2 时间复杂度	— 198
7.4.3 可靠性分析	— 198
7.4.4 传输开销	— 200
7.5 实验分析	— 201
7.6 本章小结	— 205
参考文献	— 205
附录:本书部分算法的实现代码	— 207

第一章

绪 论

1.1 引 言

近年来随着传感器技术、无线通信技术、嵌入式技术、网络技术、分布式计算理论以及普适计算理论等的日益发展和成熟,集感知、收发、存储、处理于一身的成本低、易部署的无线传感器不断涌现。工业界和工程应用领域通过部署大量这种廉价的传感器节点并自组织成多跳网络^[1],便形成了一种具有很好应用前景的网络架构——无线传感器网络^[2](Wireless Sensor Networks, WSNs)。无线传感器网络中所有传感器节点之间需要协作配合完成数据的采集、传输,并输送到汇聚节点 Sink,汇聚节点再把数据转发给各种应用单元,让用户方便快捷地获得实时的现场信息和种种物理信息^{[3][4]}。WSNs 完全能够实现对物理世界有用信息的细粒度感知,可将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起,从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的最终融合,必将改变人类与自然界的交互方式^{[5][54]}。

目前,WSNs 已成为信息时代中信息获取的关键技术之一,引起学术界、工业界的密切关注,成为自动化、计算机和通信等学科领域的研究热点^[6]。

WSNs 被《麻省理工科技评论》(MIT Technology Review)列为 21 世纪改变世界的十大技术之一,也被《商业周刊》(Business Week)列为未来四大新技术之一^[7]。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》确定了信息技术的 3 个前沿方向,其中 2 个与 WSNs 的理论研究和技术研发直接相关。目前随着大数据、“互联网+”和云计算技术的广泛推进,WSNs 的应用研究掀起了新一轮的高潮^[54]。

1.2 无线传感器网络简介

1.2.1 基本介绍

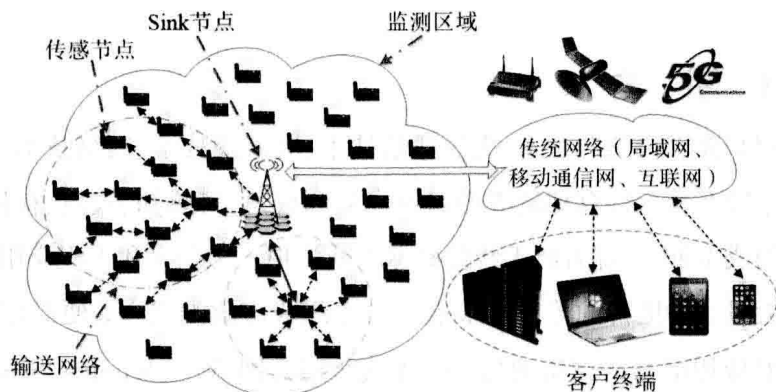


图 1-1 无线传感器网络的典型体系结构

WSNs 的典型网络系统是由传感器节点(Sensor node)、汇聚节点(Sink)、输送网络(Transporting network)、客户终端(Client)四部分组成,如图 1-1 所示。大规模传感器节点以随机抛撒或人工放置等方式被部署在监测区域内部或者周围,自组织地形成智能信息收集与传输的无线多跳网络,实时或周期性地捕获被监测对象的属性信息。输送网络以多种传输方式,比如汇聚树协议^[8-10]、移动 Sink^[11-13]以及分簇数据收集^[14-16],将这些传感信息汇入 Sink 节点。Sink 对收到的传感数据进行融合处理,然后通过局域网、互联网、

移动通信网(4G/5G)等传统信息网络将监测区域的环境对象信息发送给客户终端^[54]。

客户终端对收到的环境对象信息进行深度分析与处理,并做出相应决策,必要时还需把决策结果反馈给网络,也会把新发布的任务信息注入 WSNs,完成定制化任务的发布。WSNs 网络系统中传感器节点与 Sink 节点作为网络的实体节点,在前端数据采集与传输中扮演着重要角色^[54]。

(1) 传感器节点是 WSNs 的基本组成部分,集传感、通信、计算以及存储等功能于一体,实现对信息的智能感知、处理和传输^[17]。传感器节点通常由四个基本模块组成:感知模块、无线通信模块、电源模块和计算处理模块^[18],如图 1-2 所示。感知模块集成了传感元件,通过将传感信号变为电信号,然后进行信号放大、A/D 模数转换,得到数字信号后交给计算处理模块,可以感知不同环境信息。无线通信模块则集成了无线收发器和 MAC 模块,负责与其他传感器或基站进行信息交互,是其对外“沟通”的接口。电源模块则通常由干电池或能量收集模块组成,负责给其他三个模块供应能量。其中,干电池不可更换,而能量收集模块可以收集环境中太阳能、风能、热能以及震动能为节点提供持续的能量。计算处理模块是由 CPU、存储器、嵌入式操作系统等组成,负责协调各部分的工作,根据任务需求和网络状态对从感知模块获取的传感信息和从邻居节点收到的数据进行相应的处理、存储以及转发,同时也协调控制其他三个模块的工作,是智能信息收集与处理的核心。对于特殊应用,传感器节点还可选择 GPS 定位模块和动力模块以分别获得准确的位置信息和自主的移动能力^[54]。

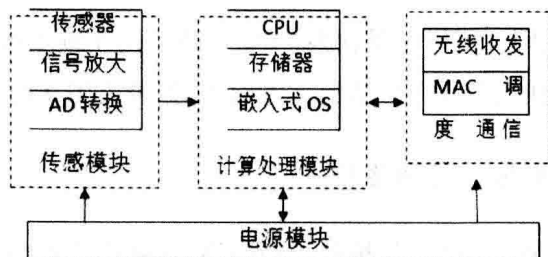


图 1-2 传感器节点组成结构

(2) 汇聚节点 Sink 是 WSNs 与外部网络进行信息交互的纽带, 可为基站或者网关, 通常被部署在容易维护、安全可靠的区域。相比普通传感器节点, 一般地, Sink 节点具有更强的通信、计算与存储能力, 还有充足的能量供应。Sink 节点负责: ①对收集网内传感数据进行融合处理与分析, 然后通过互联网、卫星、无线网络(如 WiFi、mesh 网络、4G/5G 移动蜂窝网、WiMAX 等)将被监测对象的信息发送给客户终端; ②接收客户终端的应用请求, 向网络注入新的任务; ③对传感器节点和输送网络进行任务管理和传输调度^[54]。

作为信息时代中信息获取的全新基础架构, WSNs 集无线通信、数据处理、协作监测与控制于一体, 是以数据为中心、面向应用、自组织、自配置和自管理的分布式智能信息网络。相比传统无线网络, WSNs 的网络规模更大, 节点部署更为密集; 节点资源严格受限, 容易出现软、硬件故障; 链路环境动态不可靠, 拓扑频繁发生变化; 同时, 由于没有基础设施支撑, 需要通过状态调度、拓扑控制和协作通信等快速、自主地形成无线多跳网络; 特别地, 网络部署具有任务相关性, 用户对网络构建所重点关注的是任务数据而非网络本身, 并不关心任务是如何在网络中得到响应和处理的^[54]。

WSNs 包含各种功能的传感器, 能够监测其周围的多种环境指标, 如温度、湿度、压强、速度、方向、位移、光照、化学成分、噪声等级、机械压力等。其应用横跨不同领域, 并呈现出更大规模、更广范围、更高目标的趋势, 比如军事战场^[18-24]、环境监测^[25-31]、医疗监护^[32-36]、智能家居^[37-41]、工业监测^[42-47]等多种应用。可以预见, 随着 WSNs 技术的不断突破与成熟, 在不远的将来它会深入到人类社会生活的方方面面, 促进人类文明的进步^[54]。

1.2.2 无线传感器网络特点

无线传感器网络不同于传统的无线网络, 比如移动通信网、Ad-Hoc 网、无线局域网、蓝牙网等, 前者不仅拥有后者统一的特点, 也具有其自身特有的

特点^[5,6]：

（1）节点众多，分布密集

传感器节点一般比较低廉，结构简单，抗毁性不强。为了维持网络的性能，在部分节点出现问题时也能够正常运行，提供可靠服务，网络中节点数目一般比较庞大，并且分布相对密集。在节点死亡或出现故障时，这样大规模的节点设计，能够使邻近节点接替其工作，继续进行信息的处理和目标的监控，维持网络服务的质量。但是，因为传感器节点众多，如何有效地处理节点间的通信、数据收集等也成为需要克服的困难。

（2）节点容易发生故障

传感器节点往往处于恶劣环境中，可能出于种种原因而导致其发生故障。为了保证网络能够正常工作，必须要求无线传感器网络拥有较好的鲁棒性。当遇到节点出现故障的情况时，无线传感器网络也能够绕过或接替故障节点进行正常的监控。

（3）电源供给能量有限

无线传感器网络最关键的局限在于传感器节点的能量。无线传感器网络都是由大量传感器节点组成，而传感器节点靠电池维持工作，一旦传感器节点失去供电，它就失去了信息采集和传输的功能。然而，节点能源相对不足并且无法补充，如何控制节点的能量成为网络存活时间的决定性因素。

（4）拓扑结构变化快

传感器节点在网络中的地理位置一般保持不变，处于不活动状态，但是传感器节点可能因为资源或环境问题而随时加入或者离开。这些特点导致无线传感器网络的拓扑结构常常发生较大变化，因此，整个网络要具备较强的自组织能力。

（5）防篡改改性

传感器节点结构一般比较简单，攻击者一旦获取了传感器节点，很容易获得或修改其中的数据、代码等。因此，怎样有效地防止攻击也是个难题^[7]。

(6) 以数据为中心

在无线传感器网络中,特定节点感知到的数据不会受到注意,用户重视的是监控区域感知属性值的大小,即这些数据所表示的意义。这种只重视数据本身及其所代表的意义,而忽略产生这些数据的源点和产生这些数据的过程的行为与人们平时的交谈行为更相似,也更加容易让人们理解。因此,以数据为中心是无线传感器网络的重要特点。

(7) 与应用紧密相关

像传统无线网络那样按照统一的协议进行通信,在无线传感器网络中是不可行的。因为无线传感器网络具体服务需求多种多样,传感器节点所需要采集的信息五花八门,并且传感器节点本身软硬件上的差异巨大。无线传感器网络必须针对不同的应用进行特定的优化,才能够使网络更加高效、稳定。

1.2.3 无线传感器网络的关键技术

无线传感器网络必将对人们生活造成重大的影响,是当前学术研究的重点。无线传感器网络的研究是由许多关键技术的研究组成的,主要包括:

(1) 网络拓扑控制

对于无线自组织网络,人们为了维持网络自身较好的连通性,已进行了许多拓扑控制的研究^[7]。部署环境相对复杂,传感器节点多采用电池供电,使得节点自身能量很有限,网络中节点数目一般非常多,节点部署会非常密集,频繁的网络拓扑变换,这些都是无线传感器网络自身的特点,因此,无线传感器网络对于更加优化和高效的拓扑控制算法的需求是非常迫切的^[8-11]。

由于节点故障、链路失败、节点移动等多种因素,WSNs 中节点之间的连接关系变动频繁。拓扑控制^[48]是在保证网络覆盖性和连通性的条件下,通过功率控制、分层分簇以及活跃节点选择等手段^[49],减小不必要的冗余节点或通信链路,构建一个高效的网络拓扑结构。然而,目前研究并不成熟,缺少