

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学号: 23320071152195

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

无线传感器网络数据压缩技术研究

Research on Data Aggregation for Wireless Sensor  
Network

章书勤

指导教师姓名: 肖明波 教 授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2010年 5 月

论文答辩日期: 2010年 5 月

学位授予日期: 2010年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2010年5月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

无线传感器网络是由大量廉价、具备低功率无线收发装置的传感器节点组成的自组织网络，能够协作地实时采集覆盖区域中的监测信息，进行处理后发送给观察者。节点本身能量有限，同时复杂的监测环境使得电池更换困难，因此，节能问题一直是无线传感器网络需要解决的关键问题之一。

本文从数据压缩的角度探索无线传感器网络的节能方案，基本思想是：各传感节点对采集的数据进行处理，去除冗余数据，从而减少数据传输量；同时将来自不同节点的多份数据进行汇聚，提取或综合出较单个节点数据采集更为有效、准确的数据信息，在充分降低节点能耗、延长网络生存期的基础上，达到精确感知目标信息的目的。

本论文目的是研究应用于大规模、不规则网络的分布式网内数据压缩算法。首先，结合新兴的压缩感知（Compressed Sensing 或 Compressive Sensing, CS）理论，提出了一种将 CS 应用于无线传感器网络数据压缩的方案。利用 CS 低采样率以及稀疏性的特点可以很有效地优化网络数据量并具备良好的重构效果。其次，为了更好地解决不规则网络的分布式数据压缩问题，本文基于  $k$  维检索树（kd-tree）理论，提出了 KINRUL (Kd-tree based Irregular Network to Regular Using Lifting) 算法。通过对节点的重复利用，将随机分布的不规则网络量化为规则网络且该网络具备唯一性。KINRUL 实现了不规则网络至规则网络的逻辑映射，同时利用发展较成熟的数字图像处理工具——作为 JPEG2000 标准的 5/3 提升小波技术处理化归后的规则网络。KINRUL 保留了小波分布式、多尺度的特点，解决了传统方法难以解决的不规则网络分布式数据压缩问题，对比传统算法更为简单、易于工程实现。仿真结果表明，KINRUL 在时延及能耗方面较传统算法有明显的改善。

关键词：WSN 数据压缩；压缩感知；KINRUL

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

Wireless sensor networks (WSN) are self-organized networks which are collections of sensor nodes with low-cost, low-power wireless transceiver devices. Monitoring information is collected by sensors collaborately from coverage area in a real-time way for processing and then sent to the observer. Sensor nodes are energy-limited, and it is difficult to replace batteries because of complex monitoring environment. Therefore, energy-saving problem has been one of the key issues of wireless sensor networks.

In this thesis, we explore the energy-saving issue of WSNs from the perspective of data aggregation. The basic idea is that each node processes the collected data independently to prune the redundancy, thus reducing the data size transmitted, and meanwhile, aggregate data from different nodes to extract information more accurately and efficiently than single node processing ways. In this way, we could not only sense precisely, but reduce power consumption and prolong network lifetime.

Our contributions is to study distributed inter-network data aggregation algorithms used in large-scale, irregular network. First, by combining with the emerging theory of Compressed Sensing (CS), we proposed a distributed data aggregation scheme. The feature of CS such as low sampling rate and sparsity can be very effective in optimizing the network data load and reconstruction. Second, in order to solve the problem of distributed data aggregation in irregular network efficiently, we proposed KINRUL(Kd-tree based Irregular Network to Regular Using Lifting) algorithm based on the k-dimensional tree(kd-tree) theory. Irregular network is quantified to regular one with uniqueness through the reuse of nodes in KINRUL, which means that the logic mapping from irregular network to regular is realized. Then, fast-developing modern digital image processing tool, like 5/3 wavelet Lifting, as in the JPEG2000 standard, is used to deal with the transformed regular network. KINRUL retained the distributed, multi-scale feature of the traditional wavelet methods, and it solve the problem of distributed data aggregation in irregular network which is difficult for traditional methods. KINRUL is simple and easy to implement,

and simulation results show that, compared with traditional methods, KINRUL improved time delay and energy consumption in data aggregation.

**Keywords:** WSN Data Aggregation; Compressed Sensing; KINRUL

厦门大学博硕士论文摘要库



## 目录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究现状 .....	1
1.2.1 无线传感器网络的发展现状.....	1
1.2.2 无线传感器网络关键技术.....	3
1.3 论文主要工作和结构安排 .....	4
<b>第二章 无线传感器网络及数据压缩技术</b> .....	<b>6</b>
2.1 无线传感器网络体系结构 .....	6
2.1.1 无线传感器网络组织结构.....	6
2.1.2 无线传感器网络协议结构.....	7
2.2 无线传感器网络应用的关键问题 .....	10
2.3 无线传感器网络的性能评价 .....	12
2.4 无线传感器网络数据压缩技术 .....	12
2.5 WSN 数据压缩的主要方法 .....	13
2.5.1 平面型算法.....	13
2.5.2 层次型算法.....	14
2.5.3 分布式算法.....	20
2.6 WSN 数据压缩的主要技术挑战 .....	25
2.7 本章小节 .....	26
<b>第三章 基于压缩感知的数据压缩技术</b> .....	<b>27</b>
3.1 CS 理论基础 .....	27
3.1.1 信号稀疏表示.....	29
3.1.2 观测矩阵.....	31
3.1.3 信号重构算法.....	32
3.2 CS 的应用研究举例 .....	34
3.2.1 压缩成像.....	34
3.2.2 信道编码.....	34
3.2.3 模拟/信息转换 .....	35
3.2.4 生物传感.....	35
3.2.5 无线传感器网络.....	35
3.3 本章小节 .....	36
<b>第四章 CS 在 WSN 数据压缩中的应用</b> .....	<b>37</b>
4.1 变换矩阵 $\Psi$ 的设计 .....	37
4.2 观测矩阵 $\Phi$ 的设计 .....	38
4.3 重构算法的设计 .....	38

4.4 具体实现方案 .....	39
4.5 仿真结果 .....	41
4.6 结果分析 .....	44
4.7 本章小节 .....	45
<b>第五章 基于 kd-tree 化归的数据压缩 KINRUL.....</b>	<b>46</b>
5.1 kd-tree 的基本理论 .....	46
5.2 基于 kd-tree 的网络化归算法 .....	48
5.3 5/3 提升小波 .....	53
5.3.1 小波变换的提升格式.....	53
5.3.2 5/3 小波变换的 Lifting 实现 .....	56
5.4 能耗模型 .....	58
5.5 KINRUL 算法的仿真实现 .....	59
5.6 本章小节 .....	72
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>73</b>
6.1 本文工作总结 .....	73
6.2 未来工作展望 .....	73
[参考文献].....	75
致谢.....	81
读研期间发表论文 .....	82

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Background .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Research Status .....</b>	<b>1</b>
1.2.1 Recent Development of Wireless Sensor Network.....	1
1.2.2 Key Techniques of Wireless Sensor Network.....	3
<b>1.3 Thesis Organization and Main Contents .....</b>	<b>4</b>
<b>Chapter 2 Wireless Sensor Network and Data Aggregation.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Architecture of Wireless Sensor Network.....</b>	<b>6</b>
2.1.1 Structure of WSN.....	6
2.1.2 Protocol Structure of WSN .....	7
<b>2.2 Key Issues of WSN in Application.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Performance Evaluation of WSN .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 Data Aggregation of WSN .....</b>	<b>12</b>
<b>2.5 Main Methods of WSN Data Aggregation.....</b>	<b>13</b>
2.5.1 Planar Algorithm.....	13
2.5.2 Hierarchical Algorithm .....	14
2.5.3 Distributed Algorithm.....	20
<b>2.6 Main Technical Challenge of WSN Data Aggregation.....</b>	<b>25</b>
<b>2.7 Summary.....</b>	<b>26</b>
<b>Chapter 3 Compressed Sensing based Data Aggregation.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Principle of Compressed Sensing .....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Sparse Representation of Signal .....	29
3.1.2 Measurement Matrix.....	31
3.1.3 Reconstruction Algorithm.....	32
<b>3.2 Examples of Studies on CS Applications.....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Compression Imaging .....	34
3.2.2 Channel Encoding.....	34
3.2.3 Analog-to-Information Conversion .....	35
3.2.4 Biologic CS.....	35
3.2.5 Wireless Sensor Network.....	35
<b>3.3 Summary.....</b>	<b>36</b>
<b>Chapter 4 CS in WSN Data Aggregation.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Design of Transform Matrix <math>\Psi</math> .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Design of Measurement Matrix <math>\Phi</math> .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Design of Reconstruction Algorithm .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4 Implementation Scheme .....</b>	<b>39</b>
<b>4.5 Simulation Result .....</b>	<b>41</b>

4.6 Result Analysis .....	44
4.7 Summary.....	45
<b>Chapter 5 Kd-tree Reduction based Data Aggregation .....</b>	<b>46</b>
5.1 Principle of Kd-tree .....	46
5.2 Kd-tree based Network Reduction Algorithm .....	48
5.3 5/3 Wavelet Lifting.....	53
5.3.1 Lifting Scheme of Wavelet Transform.....	53
5.3.2 5/3 Wavelet Lifting .....	56
5.4 Energy Dissipation Model .....	58
5.5 Simulation of KINRUL Algorithm .....	59
5.6 Summary.....	72
<b>Chapter 6 Conclusions and Future Work.....</b>	<b>73</b>
6.1 Conclusions.....	73
6.2 Future Work .....	73
<b>[Reference].....</b>	<b>75</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>81</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

近年来,随着无线通讯技术、传感器技术、移动计算技术和嵌入式信息处理技术的发展,无线传感器网络(Wireless Sensor Network,简称WSN)已经逐渐成为一种极具潜力的测量工具。由于应用的广泛性得到越来越多的重视,WSN被MIT著名的Technology Review杂志列为未来新兴十大技术之首<sup>[1]</sup>。目前,无线传感器网络已是IT领域的研究热点之一。

所谓的无线传感器网络,可以定义为由部署在待监测区域附近的大量传感器节点所组成的,这些节点具有体积小、功耗低、自组织、价格低廉等特性,大量这类微型廉价的传感器节点组成的网络系统能够对所在区域的环境信息进行实时采集、处理以及传递,使得远方的管理者在得到精确的现场信息后做出合适的决策。传感器网络一般由一个或者多个节点充当汇聚节点(SINK节点),传感器节点将收集到的数据通过多跳的方式传送给SINK节点,SINK节点再利用数据压缩技术,将压缩后的数据通过有线或者无线的方式传送给观察者。

无线传感器网络可以采集的信息包括温度、湿度、光照强度等,节点随机布设、自组织、环境适应等特点使其在许多重要领域,如国防军事、国家安全、环境监测、交通管理、医疗卫生、制造业、反恐抗灾等<sup>[2,3,4]</sup>领域都得到广泛应用。

### 1.2 研究现状

#### 1.2.1 无线传感器网络的发展现状

传感器网络的研究起步于20世纪80年代末期。从21世纪开始,传感器网络引起了各国军事部门、工业界和学术界的极大关注,欧美国家,尤其是美国相继启动了多项关于无线传感器网络的研究计划。随着研究的深入,它正在逐渐深入到人类生活的各个应用领域。

传感器网络研究最早源于国防军事领域的需求,其最新研究成果和主要进展也反映在该领域。美国军方率先开展研究,实施了一系列项目,取得较多成果。20世纪80年代,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects

Agency, DARPA) 启动分布式传感器网络 (Distributed Sensor Network, DSN) 项目, 在传感器、网络通信协议、信息处理和分布式系统设计等技术领域开展了研究, 主要成果包括: 卡内基梅隆大学面向通信的网络操作系统 Accent<sup>[5]</sup>以及后来的 Mach<sup>[6]</sup>; 麻省理工学院基于知识的信号处理技术<sup>[7]</sup>; 麻省理工学院林肯实验室面向低空飞行器, 基于声音信号的实时跟踪测试平台<sup>[8]</sup>等。

在工业生产和民用领域, 无线传感器网络主要应用于环境监测、医疗护理、智能家居、智能交通监控和航天探索等方面。环境监测方面, 传感器网络可用于监控工厂设备和人员运作情况, 以及工作场所的灯光、空气温度或湿度等条件; 监视农作物灌溉、土壤空气、气象形成和地质变化等; 监测和预报火山、洪水或地震等灾害现象; 还可用于对动物种群生活习性进行跟踪研究等。医疗护理方面, 传感器网络可用于监测人体内各种生理数据, 跟踪和监控医院内医生和患者的行动, 以及实施药物管理等。智能家居方面, 通过置于房间内的各种传感器感知居室不同部分的微观状况, 从而对空调、门窗以及其它家电进行自动控制, 可提供更舒适、方便和人性化的智能家居环境。智能交通方面, 美国交通部在 1995 年提出“国家智能交通系统项目规划”, 计划集成先进的传感器、数据通信、控制及计算机处理技术, 建立一个大范围全方位的实时高效综合交通运输管理系统。航天探索方面, 传感器网络可部署在飞行器或空间站的各个角落, 实施状态监控, 也可借助飞行器撒播在外星体, 对星球表面和空间物质进行长时间监测。

目前, 国际学术界对无线传感器网络的研究也非常活跃, 美国、加拿大、英国、德国、芬兰、意大利和日本等国都有研究机构从事相关技术研究。比如, 美国 NSF (National Science Foundation) 在 2003 年制定了无线传感器网络研究计划, 在加州大学洛杉矶分校成立了传感器网络研究中心, 开展“嵌入式智能传感器” (Embedded Networked Sensing, CENS) 项目, 希望通过相关基础理论研究, 实现传感器网络对现实世界的全方位监测和控制<sup>[9]</sup>。2005 年, 乔治工学院在 NSF 资助下, 进行了 SensoNet 项目, 研究适合无线传感器网络的通信协议, 包括路由协议、MAC 协议、时间同步、拓扑控制和时空相关性分析等。在 NASA 的支助下, 南加州大学开展了“无线传感器网络分布式数据压缩” (Compression Group/ DSNProject) 项目<sup>[10]</sup>, 着力于研究一种适用于无线传感器网络的低能耗数据压缩算法。我国也同步展开了在传感器网络方面的研究, 得到政府各部门的重

视与大力支持。2010 年两会，国务院总理温家宝在政府工作报告中首次提及物联网，众多代表委员也聚焦物联网，并建议把它作为国家战略来抓，可见其对于我国在今后夺取全球产业链制高点的重大意义<sup>[1]</sup>。近年来，国家自然科学基金委员会已经审批多个无线传感器网络相关的重点课题；国家发展改革委员会在下一代互联网示范工程中部署了相关课题；国防科工委也资助了相关项目的开展；中科院上海微系统研究所、软件研究所和计算所等科研机构，哈尔滨工业大学、清华大学、北京邮电大学、国防科技大学、西安交通大学、西安电子科技大学和西北工业大学等院校较早开展了传感器网络的研究工作。

### 1.2.2 无线传感器网络关键技术

#### (1) 定位技术

在很多无线传感器网络应用中，没有节点位置信息的监测信息往往毫无意义。当监测到事件发生时，关心的一个重要问题就是该事件发生的位置，如森林火灾监测，天然气管道泄漏监测等。这些事件的发生，首先需要知道的就是自身的地理位置信息。由于传感器节点存在资源缺陷、随机部署、通信易受环境干扰甚至节点失效等特点，定位机制必须满足自组织性、健壮性、能量高效、分布式计算等要求。

#### (2) 路由技术

无线传感器网络路由协议的目的是将分组从源节点（通常为传感器节点）发送到目的节点（通常为 SINK 节点），需要完成两大功能：一是选择适合的优化路径；二是沿着选定的路径正确转发数据。尽管传统的无线局域网或者移动 Ad hoc 网络基于提高服务质量 QoS 和公平性提出了很多路由协议，但这些协议的主要任务不是考虑网络能量消耗，而是追求端到端的时延最小，网络利用率最高以及避免通信拥塞和均衡网络流量的最优路径。而无线传感器网络节点具有能量限制，且考虑到网络节点数目通常很大，节点只能获取局部拓扑信息来构建路由，再加上无线传感器网络较强的应用相关性和考虑到数据的压缩处理，因此不仅传统无线网络路由协议不再适合，而且也很难设计一个适合无线传感器网络的通用路由协议。其中，无线传感器网络路由协议设计的一个主要目标就是在执行数据通信功能前提下尽可能延长网络的寿命，并通过积极的能量管理技术避免网

络连接性因节点能量不足而造成的恶化。

### (3) 信道分配技术

与基于 802.11 的无线局域网标准相比,无线传感器网络的介质访问控制协议的一个主要不同的设计目标是尽可能的降低功耗。无线传感器网络的节点一般要求有几个月乃至几年的电池寿命,从而使其对维护的要求降到最低。另外,无线传感器网络的一个主要应用场合是在工业应用中,而工业应用对高可靠性和可预测性时延有着很多严格的要求,这也对 MAC 层协议设计提出了新的挑战。

### (4) 数据压缩技术

在大规模的无线传感器网络中,由于每个传感器的监测范围以及可靠性都是有限的,在放置传感器节点时,有时要使传感器节点的监测范围互相交叠,以增强整个网络所采集的信息的鲁棒性和准确性。那么,在无线传感器网络中的感测数据就会具有一定的空间相关性,即距离相近的节点所传输的数据具有一定的冗余度。在传统的数据传输模式下,每个节点都将传输全部的感测信息,这其中就包含了大量的冗余信息,即有相当一部分的能量用于不必要的数据传输。而传感器网络中传输数据的能耗远大于处理数据的能耗。因此,在大规模无线传感器网络中,使各个节点多跳传输感测数据到 SINK 节点前,先对数据进行压缩处理是非常有必要的。

本论文主要从数据压缩的角度展开理论研究,通过对传统算法优劣势的分析,结合新兴的压缩感知(CS)技术设计了一种应用于无线传感器网络的 CS 算法。与此同时,本文还从另一个角度提出了一种适用于大规模不规则网络的分布式数据压缩算法 KINRUL。

## 1.3 论文主要工作和结构安排

本论文的研究工作围绕大规模无线传感器网络的数据压缩算法展开,首先简要介绍传统多跳网络、分簇网络,并分析了近年来的一些新兴算法,如分布式小波变换(Distributed Wavelet Transform)在不规则网络中的应用等。结合新兴理论—压缩感知(Compressed Sensing)技术,本文提出了一种将其在无线传感器网络中进行建模并应用的算法。在阐述了 CS 处理不规则网络的不足之处后,从另一个角度提出了一种处理不规则网络的方法 KINRUL,它是一种将不规则网络



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库