

物联网动态重构与协作通信技术

张德干 李 涛 李 骏 著



科学出版社

物联网动态重构与协作通信技术

张德干 李 涛 李 骏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要包括大数据环境下基于压缩感知的数据收集、节能MAC协议、网络安全信任测度、动态重构系统的重构方式、可重构资源管理、硬件任务的调度与布局以及软硬件划分、单源/单宿/多中继协作通信、两源/两宿/单中继的协作组播网络、两源/两宿/任意中继的协作组播网络等物联网技术。

本书可供物联网、计算机、网络通信等专业高年级本科生、研究生、教师学习和参考,也适合物联网、嵌入式系统以及相关领域的科研和工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

物联网动态重构与协作通信技术/张德干,李涛,李骏著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050778-5

I. ①物… II. ①张… ②李… ③李… III. ①互联网络—应用②智能技术—应用 IV. ①TP393.4②TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第279400号

责任编辑:任 静 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1 000 B5

2017年1月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:377 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



张德干, 男, 湖北黄冈英山县人, 博士(后), 教授, 博导, 天津市特聘教授。研究方向为物联网、移动计算、智能控制、无线通信等技术。主持国家 863 计划项目、国家自然科学基金项目、教育部新世纪优秀人才计划项目等十余项, 在 IEEE Transactions 等有影响的国内外期刊和会议上以第一作者发表论文 130 余篇(其中 50 余篇 SCI 索引)。出版学术专著多部。获得专利多项。获得科技奖励多项。是多个国际会议的大会主席。E-mail: zhangdegan@tsinghua.org.cn.

个人主页: <http://shenbo.org.tjut.edu.cn/tt/personinfo.asp?bianhao=199>



李涛, 男, 山东泰安人, 博士(后), 副教授, 硕导。研究方向为并行与分布式计算、GPU 计算、物联网等技术。主持(或参与)国家自然科学基金项目、科技部计划项目、天津市自然科学基金项目等多项, 在 SCI 和 EI 索引的相关研究领域的国内外期刊或学术会议上发表论文近 50 篇。出版教材多部。获得发明专利多项。担任多项学术兼职。

个人主页: <http://cc.nankai.edu.cn/Teachers/Introduce.aspx?TID=lit>



李骏, 男, 安徽六安市人, 博士(后), 教授, 博导, 江苏省特聘教授。研究方向为无线通信、物联网等技术。主持(或参与)国家自然科学基金项目、江苏省自然科学基金项目等多项, 在 IEEE Transactions 等有影响的国内外期刊和会议上发表论文 90 余篇。

个人主页: <https://sites.google.com/site/jleesr80/>

前 言

物联网有助于实现任何时刻、任何地点、任何人、任何物体之间的互连,提供普适服务。结合大数据技术的物联网应用的普及会极大地提高人们的工作效率和生活质量。VLSI 技术的进步促进了以 FPGA 为代表的可重构硬件的快速发展,尤其是具有动态部分重构能力的可重构硬件的出现,使得可重构计算成为当前物联网领域的研究热点。物联网中的协作通信系统在能量和带宽归一化的情况下,通过中继协助转发信息,可以获得更高的系统分集增益。作为一种新的空域分集技术,协作通信系统对物联网通信设备的天线数目没有要求,而是通过搜集物联网中的空闲天线作为中继,从而实现空间上的分集。对于多源/多宿的协作组播网络,在物联网中继节点实施无线网络编码还可以提高系统的吞吐量。

本书主要阐述如下几方面的内容:大数据环境下基于压缩感知的数据收集、节能 MAC 协议、网络安全信任测度、动态重构系统的重构方式、可重构资源管理、硬件任务的调度与布局以及软硬件划分、单源/单宿/多中继协作通信、两源/两宿/单中继的协作组播网络、两源/两宿/任意中继的协作组播网络等物联网技术。

本书共 12 章。第 2~4 章由张德干撰写,第 5~8 章由李涛撰写,第 9~11 章由李骏撰写,第 1 章和第 12 章为三人共同撰写。全书由张德干策划和统稿,张晓丹研究员和宁红云教授审阅。

本书得到国家 863 计划项目 (No.2007AA01Z188)、国家自然科学基金项目 (No.61170173、No.61571328、No.61003306)、教育部新世纪优秀人才计划项目 (No.NCET-09-0895)、教育部科技计划重点项目 (No.208010)、天津市自然科学基金项目 (No.10JCYBJC00500)、天津市自然科学基金重点项目 (No.13JCZDJC34600)、天津市重大科技专项 (No.15ZXDSGX00050, No.16ZXFwGX00010)、天津理工大学计算机与通信工程学院“智能计算及软件新技术”天津市重点实验室和“计算机视觉与系统”省部共建教育部重点实验室相关基金、天津市“物联网智能信息处理”科技创新团队基金 (No.TD12-5016)、天津市“131”创新型人才团队基金 (No.TD2015-23) 的资助。

本书在撰写过程中,多位教授和专家学者提出了宝贵意见,同时,得到了韩静、赵德新等同事,博士和硕士研究生汪翔、宋孝东、马震、刘思、牛红莉、周舫、李文斌、明学超、朱亚男、赵晨鹏、郑可、潘兆华、戴文博、康学净、刘晓欢、王冬、胡玉霞、刘朝敬、梁彦斌、董丹超等的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

书中难免存在不足之处,真诚欢迎各位读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	基于压缩感知的数据收集技术	4
1.3	物联网的节能 MAC 协议	6
1.4	物联网的安全信任测度技术	6
1.5	可重构技术	7
1.5.1	可重构系统相关技术基础	8
1.5.2	重构方式	13
1.5.3	模块布局	14
1.5.4	软硬件协同设计	17
1.6	协作通信技术	19
1.6.1	简介	19
1.6.2	容量与性能分析	22
1.6.3	编码协作	24
1.6.4	节点资源分配	27
第 2 章	基于压缩感知的数据收集技术	29
2.1	压缩感知相关技术简介	29
2.1.1	预备知识	30
2.1.2	压缩采样	30
2.1.3	测量矩阵的构建	30
2.1.4	信号恢复	31
2.2	基于压缩感知的无线传感器网络数据收集方案	31
2.2.1	稠密随机投影数据收集	32
2.2.2	稀疏随机投影数据收集	33
2.2.3	混合压缩感知数据收集	33
2.3	基于 SVD 稀疏测量矩阵的 WSN 压缩感知方法	34
2.3.1	相关技术	34
2.3.2	基于稀疏随机间距托普利兹矩阵的优化	37
2.3.3	基于压缩感知的链式无线传感器网络数据收集	38

2.3.4	示例应用场景设置	42
2.3.5	实验仿真	43
2.3.6	基于稀疏 SVD 循环矩阵的链式结构网络能耗仿真分析	46
2.4	WSN 中基于稀疏混合 CS 的分簇结构数据收集技术	48
2.4.1	相关工作	48
2.4.2	基于混合压缩感知的无线传感器网络模型	49
2.4.3	基于混合压缩感知的无线传感器网络数据收集算法	50
2.4.4	网络能耗分析	53
2.4.5	算法完整描述	55
2.4.6	仿真与分析	57
2.5	本章小结	61
第 3 章	低占空比低碰撞节能 MAC 协议	62
3.1	无线传感器网络简介	62
3.2	无线传感器网络节能技术	65
3.2.1	传感器节点能耗分析	65
3.2.2	功率控制技术	65
3.2.3	结构控制技术	66
3.2.4	数据融合技术	66
3.3	无线传感器网络各层分析	66
3.4	低占空比低碰撞节能 MAC 协议设计	68
3.4.1	相关 MAC 协议	68
3.4.2	算法设计	69
3.4.3	仿真分析	78
3.5	本章小结	84
第 4 章	面向物联网的分布式自适应信任测度方法	85
4.1	概述	85
4.2	网络模型	85
4.2.1	网络拓扑场景	85
4.2.2	节点能耗模型	86
4.2.3	网络攻击模型	87
4.3	分布式自适应信任测度方法设计	88
4.3.1	信任模型结构	88
4.3.2	直接信任计算	89
4.3.3	推荐信任计算	92
4.3.4	单跳模块中综合直接信任计算	95

4.3.5	多跳模块中间接信任计算	96
4.3.6	信任值更新	97
4.3.7	集成描述信任计算方法	98
4.4	协议仿真与分析	99
4.5	本章小结	105
第 5 章	物联网中的动态重构方法与系统	106
5.1	动态重构系统结构	106
5.1.1	静态模块	107
5.1.2	动态区域	110
5.2	FPGA 的动态部分重构	113
5.3	FPGA 部分重构及分析	115
5.3.1	FPGA 配置结构	115
5.3.2	配置 RAM 结构	115
5.3.3	配置控制器	117
5.3.4	配置端口	119
5.3.5	基于模块的部分重构	119
5.3.6	总线宏	120
5.3.7	实现流程	121
5.3.8	基于差异的部分重构	122
5.3.9	实验结果及分析	122
5.4	FPGA 动态模块重定位	125
5.4.1	快速重构方法	125
5.4.2	重构方式描述	126
5.4.3	动态模块重定位	127
5.5	本章小结	130
第 6 章	基于 VirtexII 的可重构资源管理系统	131
6.1	可重构资源管理	131
6.1.1	可重构资源及分类	131
6.1.2	段页式资源管理	133
6.1.3	管理模型	135
6.2	原型系统设计	138
6.3	原型系统实现	144
6.3.1	整体结构	144
6.3.2	通信网络	146
6.3.3	控制模块	146

6.4	本章小结	151
第 7 章	资源管理与 2D 任务布局	152
7.1	系统模型	152
7.2	资源管理方法与 2D 任务布局策略	154
7.2.1	相关研究	154
7.2.2	资源管理	155
7.2.3	MER 查找操作	159
7.2.4	MER 更新操作	160
7.2.5	布局算法	162
7.2.6	碎片评价	163
7.3	实验结果及分析	164
7.3.1	参数设置	165
7.3.2	实验结果	166
7.4	本章小结	169
第 8 章	面向动态重构系统的软硬件划分	170
8.1	考虑布局的软硬件划分	170
8.1.1	系统模型	170
8.1.2	任务模型	171
8.1.3	软硬件划分描述	173
8.2	软硬件划分与调度	174
8.2.1	基于遗传算法的软硬件划分	174
8.2.2	动态优先级调度算法	177
8.3	性能分析与讨论	182
8.3.1	参数设置	182
8.3.2	实验结果及分析	183
8.4	本章小结	189
第 9 章	单源单宿多中继协作通信系统的吞吐量-可靠性分析	190
9.1	系统模型	190
9.2	基于 AF 协议的吞吐量-可靠性权衡分析	191
9.2.1	数学模型及引理	191
9.2.2	吞吐量-可靠性权衡分析	193
9.2.3	基于吞吐量-可靠性权衡的误帧率分析	195
9.2.4	仿真结果与分析	195
9.3	基于 DF 协议的吞吐量-可靠性权衡分析	200

9.3.1 基于网络信息论的模型分析	200
9.3.2 吞吐量-可靠性分析	202
9.3.3 仿真结果与分析	203
9.4 本章小结	205
第 10 章 双源双宿单中继协作组播网络的性能分析及优化	206
10.1 系统模型	206
10.2 分集-复加权衡分析	207
10.2.1 数学模型及引理	207
10.2.2 基于 NRNC 协议的分集-复加权衡分析	210
10.2.3 基于 RCNC 协议的分集-复加权衡分析	211
10.2.4 基于 RGNC 协议的分集-复加权衡分析	212
10.2.5 仿真结果与分析	212
10.3 节点功率分配优化	215
10.3.1 基于发射端统计信道信息的功率分配	215
10.3.2 基于发射端瞬时信道信息的功率分配	220
10.3.3 仿真结果与分析	222
10.4 本章小结	224
第 11 章 双源双宿多中继协作组播网络的预编码设计	226
11.1 系统模型	226
11.2 基于 NRNC 协议的性能分析及预编码设计	227
11.2.1 数学模型	227
11.2.2 系统误帧率分析	228
11.2.3 预编码设计	232
11.3 基于 RCNC 协议的性能分析及预编码设计	234
11.3.1 数学模型	234
11.3.2 系统误帧率分析	236
11.3.3 预编码设计	238
11.4 基于 RGNC 协议的性能分析及预编码设计	240
11.4.1 数学模型及误帧率分析	240
11.4.2 预编码设计	240
11.5 仿真结果与分析	240
11.6 本章小结	244
第 12 章 展望	245
12.1 数据采集与节能技术展望	245

12.2 动态重构技术展望	245
12.3 协作通信技术展望	246
参考文献	247
附录 定理证明	264
A.1 定理 9.1 的证明	264
A.1.1 TRT 表达式的下界	265
A.1.2 TRT 表达式的上界	269
A.2 定理 9.2 的证明	272
A.2.1 逆定理证明	272
A.2.2 可达性证明	273
A.3 定理 9.3 的证明	275
A.3.1 TRT 表达式的下界	277
A.3.2 TRT 表达式的上界	280
A.4 定理 10.1 的证明	284
A.4.1 分集增益的上界	284
A.4.2 可达性证明	287
A.5 定理 10.2 的证明	289
A.5.1 分集增益的上界	289
A.5.2 可达性证明	293
A.6 定理 10.3 的证明	295
A.6.1 分集增益的上界	295
A.6.2 可达性证明	297
A.7 缩略语表	298

第1章 绪 论

1.1 概 述

2005年,在信息社会世界峰会(W SIS)上,国际电信联盟(ITU)发布了 *ITU Internet reports 2005—the Internet of things*, 其引用的“物联网”概念在定义和范围上发生了较大变化,同时拓展了此概念的覆盖范围,宣告物联网时代真正到来。2009年,IBM 首席执行官首次提出“智慧地球”这个概念,并被美国作为经济振兴的重要策略之一,甚至可以上升为国家战略,引起了极大的关注。同年,中国也将“感知中国”物联网正式列为我国的五大新兴战略性产业之一;同时,世界许多其他国家也相继设立自己的物联网行动计划,使得物联网技术在这一时期得以迅速发展。2012年,中国颁布第一个物联网五年规划,未来的十年,物联网及其相关产业技术的发展将更加迅猛,物联网的应用也将覆盖全球范围。

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)技术作为物联网发展的重要支撑技术,在物联网的大发展环境下也取得了显著的进步。但对于无线传感器的应用则从20世纪60年代就开始了,起初只是应用在军事领域,用来收集战场信息从而作出指挥。随着传感器技术的进一步发展,独立具备计算能力、感知能力、通信能力的现代化微型传感器应用越来越普及。WSN 技术已在医疗事业、交通管理、智能家居、环境监测、抢险救灾、目标追踪等许多民用领域获得了广泛应用,因此,被国际上公认为继互联网之后第二大网络。美国期刊《技术评论》曾评出未来将对人类生活影响深远的十大新兴技术,列为第一的是传感器网络技术,可见 WSN 应用前景巨大,对 WSN 技术的研究将带来更深远的影响。

无线传感器网络中节点有限的电池能量等极大地限制了无线传感器网络的发展。由于网络中节点资源和网络资源消耗不平衡,导致了无线传感器网络不能大量部署。无线传感器网络中,由于大量的节点部署在同一个地区,因而导致邻居节点收集的数据之间相关性比较强,因此人们想到对无线传感器网络内各个节点上收集到的数据进行压缩,从而达到减少网络传输中的数据包的目的。由于无线传感器中的网络能量消耗主要来源于节点接收与转发数据包,所以减少了网络中传输的数据包量能够有助于减少网络的能耗。

20世纪初,美国工程师奈奎斯特推出了采样定理,称为奈奎斯特采样定理,它诠释了采样频率与信号频谱之间的关系,并提出了连续信号进行离散化的依据。它指出

在进行信号采样的过程中，只有当信号的采样频率至少达到信号最高频率的两倍时，原始信号中的信息才能够被全部保留下来，即信号能够从它的采样信号中恢复。因此，带宽是奈奎斯特采样定理的核心。现在的许多设备，如摄像机、高速数/模变换器、雷达、音频电子产品都以此原则为准。但是，由于采样频率太高，为了存储并传输许多数据，只能将它们进行压缩。而且，针对如今无线传感器网络的实际应用，信号的带宽与其所需的采样频率以及存储空间等密切相关，大大增加了时间、空间、金钱成本。

由于现代技术的发展，生活中的数据量日益增长，但是大部分数据之间总是存在很大的相关性、冗余性。如果并不需要全部信息，这似乎是一种资源浪费。在开始阶段，以较高的成本获得并保留了信号的全部信息，最终进行压缩时，却只保留了那些主要信息部分，大量冗余无用的信息被丢弃。从这方面来看，可以只保留信息的主要部分。传统的信号处理就是这样，先是完全采集所有数据，然后通过压缩去掉数据的冗余信息，虽然看起来减少了网络中的传输量，但是从另一方面来看，网络需要为各个传感器增加压缩的功能，无线传感器网络中的传感器资源有限，增加这一功能大大增加了网络的成本与复杂性。是否有办法能直接取得信号数据的主要信息成分，而不需要额外的压缩步骤呢？压缩感知算法就是为了达到这一目的而产生的，人们首先将模拟信号基于某个基（如小波变换）进行稀疏变化，然后仅留下那些大的系数的值，这样可以直接近乎得到信号的完整信息。它突破了奈奎斯特采样条件的限制，即采样频率必须大于等于信号最高带宽的两倍，从而降低了采样频率，节省了采样资源。

目前压缩感知理论已经在图像处理、生物传感等领域有了巨大发展。Sankaranarayanan 等（2011）针对不同信号检测情况进行了压缩检测与估计研究；有学者根据域压缩的图像压缩照相机框架，成功发明了单像素数码相机；Baraniuk 等通过研究基因晶片上的 DNA 微阵列，减少了患者对医学器材的不舒适感；还有分布式视频压缩传感；基于目标跟踪的图像压缩等方向。近期，国内大量研究了压缩传感理论和实际应用，取得了许多成果。例如，西安电子科技大学针对压缩感知在日像仪阵列设计等方面进行研究，提出了超低速率采样检测理论；安徽大学基于图像等模拟信号对压缩感知中稀疏测量矩阵和恢复算法进行了研究；燕山大学研究了压缩感知与协方差的频谱感知技术，做了重建 CT 图像以及手写字符识别等工作；厦门大学将压缩感知理论应用到图像数据重建，研究了自适应稀疏字典模型。

如何选择合适的测量矩阵一直是压缩传感理论的关键问题。Candes 等研究提出了限制性等距性 RIP (restricted isometry property) 准则，同时给出了观测矩阵满足 RIP 准则的证明。目前，高斯随机矩阵、伯努利随机矩阵等矩阵作为压缩感知理论中用到的矩阵都符合相应的 RIP 条件。在随机观测矩阵的基础上，很多学者进行了深入的研究，如对已知的观测矩阵进行优化，有文献将观测矩阵的行向量进行正交化改进；有文献提出了 QR (Q-orthogonal-matrix & R-triangular-matrix) 分解的思想，用于改善随机矩阵；有文献将混沌序列引入压缩感知理论中；有文献提出了一种新型观测矩阵，即确定性观测矩阵。

为了将压缩感知理论应用到大数据环境的实际中,首要条件是看实际情况是否稀疏,即是否需要通过少量信息包含大量数据,例如,大幅提高应用系统性能,减少信息存储空间及提高信息传输速度等。但是需要明确的是,压缩传感理论无法处理那些“非稀疏”信号,如噪声。并且在某些实际应用中,奈奎斯特采样定理仍旧无法被取代,压缩感知理论还需深入的研究与发展。

随着微电子技术的不断创新和发展,大规模集成电路的集成度和工艺水平不断提高,已从深亚微米($<0.5\mu\text{m}$)进入到超深亚微米($<0.25\mu\text{m}$)和纳米(90nm),其特征是工艺特征尺寸越来越小,芯片尺寸越来越大,单片上的晶体管数越来越多,时钟速度越来越快,电源电压越来越低,布线层数越来越多,I/O 引线越来越多,这使得以 FPGA 为代表的可重构硬件(reconfigurable hardware)取得了巨大的进步。对于许多应用来说,利用硬布线方法的内在并行性和在单个阵列上执行多个任务的并发性等技术,通过在可重构硬件中实现软件的某些部分,已经取得了巨大的软件加速比和能耗的下降。

在微处理器中,每个时钟周期执行一个计算操作步骤,中间结果存储在寄存器中,将这样的一个算法从微处理器移植到可重构硬件上,也就是从时间域映射到空间域实现相同的操作,则将会在逻辑电路上并行执行。一旦这个执行完成,下一个并行代码被执行,中间结果使用缓冲区进行通信,计算花费的时钟周期数能够显著减小。将不同的简单应用从 CPU 迁移到 FPGA 上获得的加速比大约为 7~46。需要注意,加速因子在很大程度上都受到面向应用的实现算法的影响。由此可见,通过将计算问题从微处理器(时间域)迁移到面向应用的逻辑电路(空间域)上可以获得较高的性能加速,无论是能量有效性还是计算时间都有很大程度的提高。

重构可分为静态重构和动态重构两种,前者指断开先前的电路功能后重新下载存储器中的配置信息来改变可重构硬件的逻辑功能,基本上所有的 SRAM 型 FPGA 都可实现静态重构,常用于 ASIC 原型系统开发。后者则在改变电路功能的同时仍然保持电路的动态连续。

动态重构技术主要是指对于特定的基于 SRAM 结构的 FPGA,在一定的控制逻辑的驱动下,对芯片的全部或部分逻辑资源实现在系统高速功能变换和时分复用。就其实现重构的面积不同,又可分为全局重构和局部重构。

全局重构:对 FPGA 器件或系统能且只能进行全部重新配置,在配置过程中,中间结果必须取出存放在额外的存储区,直到新的配置信息全部下载完,重构前后的电路相互独立。配置信息通常存放在与重构器件相连的 EPROM 中,以实现功能的转换。

局部重构:对 FPGA 器件或系统的一部分逻辑进行重新配置,在此过程中,其余部分的工作状态不受影响。Xilinx、Atmel 等公司的 FPGA 支持运行状态下的动态局部重构,这种重构方式减小了重构范围和单元数目,能够大大降低重构带来的时间开销。

目前,Xilinx 公司的 FPGA 能够支持自重构,即芯片本身的控制系统能够执行其他部分区域的重构。很多平台 FPGA 能够支持多款微处理器核,尤其是 Virtex II Pro

这类内嵌了 PowerPC 硬核的芯片的出现,为可重构片上系统的实现提供了良好的硬件平台。FPGA 等可重构硬件的动态部分重构能力使系统能够在运行时动态地重新配置芯片的部分区域,而不影响其他区域的功能电路,为实现动态重构系统提供了良好的硬件平台。尤其是,随着可重构硬件集成度和规模的不断提高,将包括微处理器、存储器、DSP 和各种接口集成到一块芯片成为可能,为片上系统的实现奠定了基础。

协作通信技术 (cooperative communication) 利用网络中闲置的天线资源作为信源的中继 (relay) 协助转发信息,通过不同天线传输相同的数据达到空间分集的目的,以提高通信系统的可靠性,是继 MIMO (multiple-input multiple-output) 多天线技术之后无线通信领域内又一前沿研究课题。MIMO 技术经过十年的发展,虽然在理论研究上已日臻完善,但在实际应用中受到移动设备尺寸的制约。相比之下,协作通信技术对通信节点的天线数目没有要求,而是通过搜集网络中的闲置天线,形成分布式虚拟天线阵列 (virtual MIMO) 协作传输数据,因此具有实际应用价值。研究表明,在网络能量归一化的情况下,协作通信系统的性能明显优于直接传输的系统性能。协作通信技术不仅将成为未来移动通信和无线局域网的关键技术,而且在无线传感器网络这种资源有限的分布式环境中更具有 MIMO 所无法比拟的优势。

虽然协作通信系统的模型设计已经相对比较完善,但是模型的性能分析仍然非常复杂和困难,且基于的标准也各不相同。比较常用的性能分析工具是 Diversity-Multiplexing Tradeoff (DMT)。DMT 最初是在 MIMO 技术中发展起来的一种快速有效验证某种空时编码系统优劣的线性公式,后被引入协作通信系统中,作为各种模型的性能分析准则。DMT 通过综合考虑误帧率和系统容量,能更加全面地评判一个通信系统的优劣。但是,DMT 也有一定的局限性,无法更好地对系统的中断概率趋势作出预测。Throughput-Reliability Tradeoff (TRT) 作为 DMT 的在 MIMO 系统中的一种改进,在继承了 DMT 的优点的同时,通过线性逼近的方式给出了中断概率和系统误帧率的趋势预测。相对于 DMT,TRT 可以对系统有更深入的了解。但是 TRT 的提出者指出不能确定 TRT 能否用于 MIMO 以外的通信系统。因此,如果能将 TRT 引入协作通信系统,将会促进对各种模型及协议的了解和设计。

1.2 基于压缩感知的数据收集技术

随着传感器、集成电路等技术的高速发展,无线传感器网络日益得到了人们的关注,由于其具有低功耗、大量数据处理能力等优点,被广泛应用于环境、军事、交通等各个领域,它克服了传统有线传感器网络通信线路等设备布置复杂等缺点。无线传感器网络主要由大量微型传感器节点构成,网络中的节点通过无线通信的方式与汇聚节点进行数据交互。无线传感器网络是由许多体积小的无线传感器节点组成,由于这

些传感器节点能量有限,如何有效提高节点的能量使用率,从而增加网络的生命周期,一直是无线传感器网络研究的热点。

大数据环境中普遍存在的压缩现象,即在收集完信号的全部信息之后又去除了大量的冗余信息,使得人们想到能否直接采集信号的主要信息,但是暂时无法知道它们的先验位置,因而无法直接测量大的稀疏系数。近年来,Candes、Tao、Donoho等基于信号在某个基上的稀疏性,提出了压缩感知技术。该技术仅仅依靠远远低于奈奎斯特定理规定的采样频率就可以保留信号的完整信息,并且通过相应的重构算法恢复出了原始信号。

简单地说,压缩感知技术的中心思想是当信号在某个基上是稀疏的,通过与稀疏基非相干的测量矩阵将信号进行降维采样,只保留信号的主要信息部分,最终通过求解非线性最优化问题再将低维稀疏信号高概率恢复成原始信号。可以看出,并不需要很高的采样频率,而仅需信号满足两个条件,即信号稀疏或者可压缩,以及用于降维的观测矩阵与稀疏基非相关,编码端非常简单,这在能量有限的无线传感器网络中,可以有效降低各个微型节点的能量消耗。

从技术上来说,压缩感知理论在一定程度上完全取代了奈奎斯特采样定理,大大降低了采样频率。图 1.1 给出了传统数据先采样再压缩的过程与采用压缩感知过程的比较,可以看出,传统采样过程经过先采样再压缩的过程,需要 N 次测量,而压缩感知理论根据数据之间的冗余度,采用非相关测量,只需 $M \ll N$ 次测量,得到降维后的信号,再利用相应的一些重构算法即可恢复原始信号。

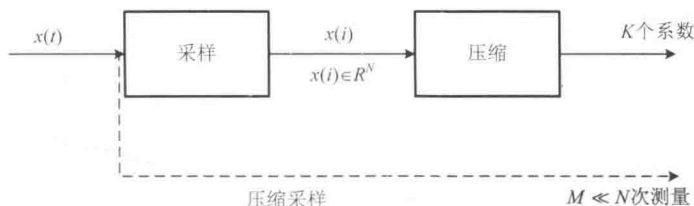


图 1.1 典型的传统采样压缩过程和压缩感知的采样过程

压缩感知理论在采样阶段仅需收集少量的数据,在恢复阶段相对来说比较复杂,降低了原本奈奎斯特复杂的数据收集阶段复杂性,这完全符合无线传感器网络的构造。因此,将压缩感知技术运用到无线传感器网络中进行大量数据处理将会十分有意义。

2004 年,Candes 教授等首次利用一个合适的编码矩阵以及相应的重构算法恢复了信号,接着 Candes 教授、Donoho 教授等在 2006 年在 *IEEE Transactions on Information Theory* 上正式从数学角度严格证明了其正确性,正式提出了压缩感知的概念。虽然压缩传感理论提出时间不长,但其吸引了大量的关注,尤其在信号数据处理等方面。有文献提出了贝叶斯压缩感知的概念和 1bit 压缩感知的概念,Baron 等针对分布式网络的特点于 2009 年提出了分布式压缩感知(distributed compressive sensing, DCS),指

出多个观测源可以采用联合重构的算法重建出原始信号。Baraniuk 等提出了基于模型的压缩传感的理论框架，不仅分析了这种模型下信号重构算法的性能，而且证明了稀疏信号能够极大提高重构算法的性能。有文献提出序列压缩感知的概念，采用二进制采样序列向量决定当前稀疏信号。综上所述，目前压缩感知主要集中在信号的稀疏变换、观测矩阵的设计、信号重构算法等方面，还有许多理论问题需要解决与完善。

1.3 物联网的节能 MAC 协议

无线传感器网络由于其监控范围广，无须人为值守的优点，被广泛应用于工业自动化、安全监测、天气分析和一些军事方案等。但传感器节点电池能量的有限性也直接影响了节点和网络的生存周期，阻碍了 WSN 的进一步发展应用，因此，如何提高能源利用效率，研究设计相关的节能协议，成为这个领域的热点问题。对于无线传感器网络中的节点，能量主要消耗在监测信息与数据收发上，而除了这些必要的能量消耗，对于媒质访问控制层（medium access control, MAC），像碰撞重传、串音、空闲侦听、控制信息过多、发送失效这些情况也会浪费不必要的能量。MAC 层协议是控制信息和数据报文在无线信道上进行收发的直接控制者，在确定网络的吞吐量、时延、带宽利用率和能量消耗上起着重要作用，也会间接影响上层路由协议和传输协议的性能。所以，研究设计高效的 MAC 协议是确保 WSN 服务质量的关键问题。MAC 协议方案图如图 1.2 所示。

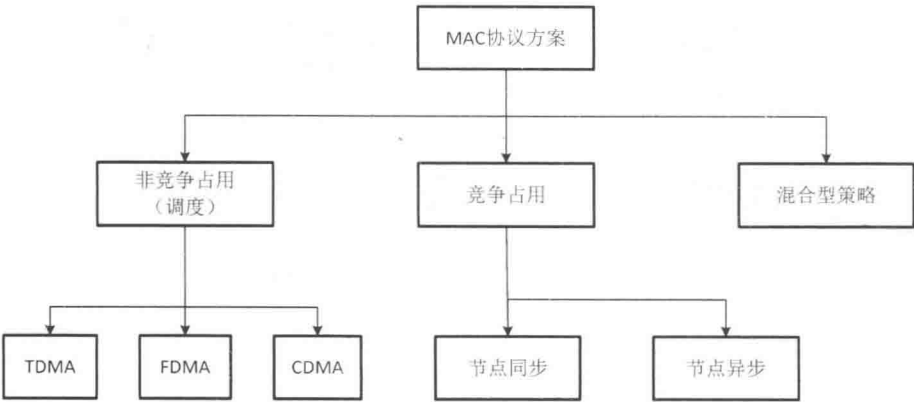


图 1.2 MAC 协议方案图

1.4 物联网的安全信任测度技术

针对物联网（Internet of things, IOT）的安全信任问题，目前已经提出了多种安全机制来应对窃听攻击、数据伪造攻击等，如安全身份验证、消息完整性验证、消息