

随机多址通信系统 理论及仿真研究

 丁洪伟 柳虔林 赵一帆 周圣杰 杨志军◎著



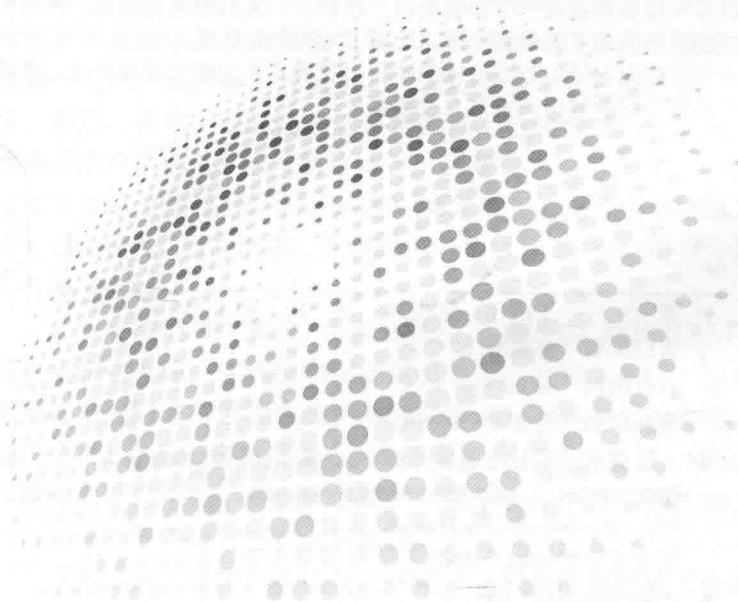
中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

随机多址通信系统 理论及仿真研究

◎ 丁洪伟 柳虔林 赵一帆 周圣杰 杨志军◎ 著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

随机多址通信系统理论及仿真研究 / 丁洪伟等著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2017.2

ISBN 978-7-115-43882-9

I. ①随… II. ①丁… III. ①Matlab软件—应用—多址协议—仿真 IV. ①TN915.04

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第256994号

内 容 提 要

本书首先介绍了随机多址通信系统广泛应用于物联网、无线传感器网络、移动互联网络、无线局域网、蜂窝通信网络等通信技术的情况; 对各类随机多址通信系统进行了建模分析, 获得了一系列的解析结果; 然后介绍了各类系统的计算机仿真方法, 给出了相关仿真结果。

本书可作为电子信息类专业的本科生和研究生的教材或参考书, 也适合信息通信工程领域相关研究人员阅读。

◆ 著 丁洪伟 柳虔林 赵一帆 周圣杰 杨志军

责任编辑 邢建春

执行编辑 张亚晓

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京天宇星印刷厂印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 5.75

2017 年 2 月第 1 版

字数: 155 千字

2017 年 2 月北京第 1 次印刷

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010) 81055410 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

前 言

无线传感器网络（WSN，Wireless Sensor Network）作为信息化时代的一项非常重要的新兴技术，已经引起了世界范围内的极大关注，与当前的无线局域网、移动通信网络、蜂窝通信等相比，无线传感器网络具有很大的发展潜力。无线传感器网络是由大量分布式传感器节点组成的面向任务型的自组织网络，可以进行数据收集和传输，为用户提供有用的信息。在国防军事、工农业控制、卫生医疗、抢险、救灾、反恐防恐、环境监测、危险区域远程控制等领域有潜在的应用前景。由于网络站点自身固有的通信能力、计算速度、存储容量以及能量等方面的限制，深入研究无线传感器网络具有很大的挑战性和广阔的空间。无线传感器网络是 21 世纪很有发展潜力的技术之一。

对于有线局域网来说，其信道处于开放状态，链路状况不稳定，带宽资源也有限，在性能和服务质量方面还有很大差距。因此，如何更好地使用其有限的资源变得越来越重要。MAC 层的作用主要是提供公平、可靠、有效的调度机制来分配无线信道资源，MAC 协议性能的好坏直接关系到无线信道的利用率和整个网络的性能。它一直是国内外学者研究的重点和难点。

当网络由大量用户组成而这些用户又只是间歇性地工作时，采用固定分配多址或按需分配多址效率很低，需要采用随机多址技术。按照信道资源的共享方式，多址技术通常又可以分为 3 类：固定分配多址、按需分配多址和随机多址。目前已经得到广泛应用的随机多址技术有 3 类：ALOHA 多址、CSMA 和 CSMA/CD、CSMA/CA。

作者根据国内外采用 Matlab 仿真随机多址协议的现状,结合自身学习的经验,以适用为基本原则,详细讲解了基于 Matlab 的随机多址协议仿真的具体方法,总结了作者研究、学习随机多址协议的经验、技巧。全书内容从经典的 ALOHA 协议的基本原理到二维概率 CSMA 协议吞吐量的推导,从单一的时隙 ALOHA 到三次握手带监控功能的二维概率 CSMA 的实现,以及各协议的仿真,以循序渐进的方式带领读者深入学习和研究,帮助读者快速掌握并更好地学习、理解这些随机多址技术。

全书共分为 10 章。

第 1 章介绍无线传感器网络及多址技术,并对后续部分涉及的六大协议进行简单介绍,让读者对随机多址协议及应用领域有一个整体的认识。

第 2 章介绍本书仿真所使用的仿真软件 Matlab 及仿真的具体操作步骤,以帮助读者快速熟悉开发环境。

第 3 章详细介绍经典的 ALOHA 协议和时隙 ALOHA 协议以及它们基于 Matlab 平台的具体仿真方法。

第 4~8 章分别介绍非坚持 CSMA 协议、1-坚持 CSMA 协议、P-坚持 CSMA 协议、P-检测 CSMA 协议、二维概率 CSMA 协议和在其各自协议基础上改进得来的 2 个协议,以及协议基于 Matlab 平台的具体仿真方法。

第 9 章详细介绍非隔离型二叉树冲突分解算法,以及其基于 Matlab 平台的具体仿真方法。

第 10 章对本书所涉及的具体协议进行比较,并做了一个简要的总结。

本书语言简洁,结构清晰,内容系统全面,注重基础知识与仿真结合。在协议的讲解上,既介绍了协议的原理、吞吐量的具体推导过程,提供了仿真的具体步骤及代码,也提供了处理结果的一些经验技巧和注意事项,旨在提高读者的理论知识和仿真能力。

本书涉及的知识范围广,读者需要一定的随机多址协议的基础、数学推导能力(离散概率论)和 Matlab 编程基础。本书适合高等院

校计算机科学与技术、电子工程、通信工程等相关专业的本科高年级学生、研究生学习，也可供 MAC 协议研究与开发的科研人员参考。

由于作者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免有错误和不足之处，诚望读者批评指正。

作者
2016 年 9 月

目 录

第 1 章 无线传感器网络与多址技术概述	1
1.1 无线传感器网络	1
1.2 多址技术	6
第 2 章 Matlab 简介	11
2.1 Matlab 软件简介及界面预览	11
2.2 软件使用流程	12
第 3 章 ALOHA 协议	15
3.1 纯 ALOHA 协议	16
3.1.1 协议原理	16
3.1.2 吞吐量推导	16
3.1.3 Matlab 仿真	17
3.2 时隙 ALOHA 协议	22
3.2.1 协议原理	22
3.2.2 吞吐量推导	23
3.2.3 Matlab 仿真	24
第 4 章 非坚持 CSMA 协议	29
4.1 非坚持 CSMA 协议	29
4.1.1 协议原理	29

4.1.2	吞吐量推导	30
4.1.3	Matlab 仿真	33
4.2	带监控功能的非坚持 CSMA 协议	37
4.2.1	协议原理	37
4.2.2	吞吐量推导	38
4.2.3	Matlab 仿真	39
4.3	带监控功能的三次握手非坚持 CSMA 协议	43
4.3.1	协议原理	43
4.3.2	吞吐量推导	44
4.3.3	Matlab 仿真	44
第 5 章	1-坚持 CSMA 协议	49
5.1	1-坚持 CSMA 协议	49
5.1.1	协议原理	49
5.1.2	吞吐量推导	50
5.1.3	Matlab 仿真	54
5.2	带监控功能的 1-坚持 CSMA 协议	59
5.2.1	协议原理	59
5.2.2	吞吐量推导	59
5.2.3	Matlab 仿真	60
5.3	带监控功能的三次握手 1-坚持 CSMA 协议	65
5.3.1	协议原理	65
5.3.2	吞吐量推导	66
5.3.3	Matlab 仿真	66
第 6 章	P-坚持 CSMA 协议	72
6.1	P-坚持 CSMA 协议	72
6.1.1	协议原理	72
6.1.2	吞吐量推导	74
6.1.3	Matlab 仿真	79

6.2 带监控功能的 P-坚持 CSMA 协议	84
6.2.1 协议原理	84
6.2.2 吞吐量推导	85
6.2.3 Matlab 仿真	85
6.3 带监控功能的三次握手 P-坚持 CSMA 协议	90
6.3.1 协议原理	90
6.3.2 吞吐量推导	91
6.3.3 Matlab 仿真	91
第 7 章 P-检测 CSMA 协议	97
7.1 P-检测 CSMA 协议	97
7.1.1 协议原理	97
7.1.2 吞吐量推导	98
7.1.3 Matlab 仿真	102
7.2 带监控功能的 P-检测 CSMA 协议	107
7.2.1 协议原理	107
7.2.2 吞吐量推导	108
7.2.3 Matlab 仿真	108
7.3 带监控功能的三次握手 P-检测 CSMA 协议	113
7.3.1 协议原理	113
7.3.2 吞吐量推导	114
7.3.3 Matlab 仿真	114
第 8 章 二维概率 CSMA 协议	120
8.1 二维概率 CSMA 协议	121
8.1.1 协议原理	121
8.1.2 吞吐量推导	122
8.1.3 Matlab 仿真	126
8.2 带监控功能的二维概率 CSMA 协议	131
8.2.1 协议原理	131

8.2.2	吞吐量推导	132
8.2.3	Matlab 仿真	132
8.3	带监控功能的三次握手二维概率 CSMA 协议	138
8.3.1	协议原理	138
8.3.2	吞吐量推导	139
8.3.3	Matlab 仿真	139
第 9 章	树形冲突分解算法	145
9.1	冲突分解算法	145
9.1.1	二叉树冲突分解算法	146
9.1.2	非隔离型二叉树冲突分解所需时隙数的推导	148
9.2	Matlab 仿真	149
9.2.1	编写协议仿真流程	149
9.2.2	编写仿真程序	150
9.2.3	运行仿真程序	151
9.2.4	收集结果, 整理数据	151
第 10 章	各协议吞吐量对比及总结	152
10.1	纯 ALOHA 协议和时隙 ALOHA 协议	153
10.1.1	原理的比较	153
10.1.2	吞吐量的比较	153
10.2	不同类型的 5 种 CSMA 协议	155
10.2.1	原理的比较	155
10.2.2	吞吐量的比较	156
参考文献		167

第 1 章

无线传感器网络与多址技术概述

1.1 无线传感器网络

科技发展的脚步越来越快，人类已经置身于信息时代，以 Internet 为代表的信息网络技术成为 21 世纪信息科学技术的一项伟大成果。它影响和改变着人们日常的生产和生活方式。就像世界上第一台计算机的诞生一样，将人类推进了信息网络的新时代。在日常的生产和生活中，人们不但可以随时方便地通过 Internet 交流，而且还可以足不出户地进行网络购物和网上银行交易。现代生活中的人们每时每刻都与 Internet 有着紧密的联系。或许人们会认为 Internet 技术已经全部实现了它的发展潜力，且很强大。然而，无论 Internet 的网络功能和网络世界再怎么强大和丰富，它却始终无法感知我们的现实生活，无法主动地为我们的生活和生产服务。随着人们物质文化生活水平的不断提高，Internet 将无法胜任现实生活中的许多工作。时代在孕育着新的网络技术，无线传感器网络就是在这样的背景下应运而生的。

早在 20 世纪 70 年代，就出现了将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成的传感器网络雏形，人们把它归结为第一代传感器网络。随着相关学科不断发展，传感器网络同时还具有获取多种信息信号的综合处理能力，并通过与传感器控制器的相连，

组成了有信息综合和处理能力的第二代传感器网络。从 20 世纪末开始,人们利用现场总线技术组建智能化传感器网络,并运用大量多功能传感器技术以及使用无线技术进行连接,无线传感器网络逐渐形成。无线传感器网络的研究和应用最早可以追溯到冷战时期,因为军事需求,美国成为最早传感器网络的研究国家,它的研究历程可大致概括为早期、初期、近代和现代 4 个阶段。20 世纪 60 年代被称为早期阶段,该阶段无线传感器网络的代表项目有美国的军用系统海底声响监视系统(SOSUS, Sound Surveillance System)和雷达防空网络(AWACS, Airborne Warning and Control System),其中,SOSUS 是基于海底传感器阵列的监视系统,主要用来检测核潜艇的行踪。AWACS 是为了使传感器网络在军事和民用领域被广泛应用。这个时期进行的一些基础研究工作,如对信息处理技术的研究,都为无线传感器网络技术的发展打下了良好的基础。20 世纪 70 年代初期阶段,美国 DARPA 提出分布式传感器网络(DSN, Distributed Sensor Network)项目,它开启了现代无线传感器网络的先河,主要用于飞行器的监视和入侵检测。DSN 对传感器网络的组成进行了技术规范和定义,并对一些基础技术进行了研究,主要包括网络操作系统、网络传感器技术、基础知识的信号处理技术、信息处理技术、分布式网络系统、信号跟踪技术等。20 世纪 90 年代中期阶段,开始了低功率无线集成微型传感器研究计划,其中比较著名的是美国的一个海军项目协同交战能力(CEC, Cooperative Engagement Capability)系统,它利用海基和空基的雷达系统对空中目标进行跟踪和定位。这个阶段产生的技术,如大规模集成电路制造技术、计算机技术和通信技术等,都取得了很大的进步,从而直接推动了无线传感器网络研究的持续发展。现代阶段是从 20 世纪 90 年代末期开始,这个时期出现了由美国 Dust Inc 同加州大学伯克利分校合作的智能尘埃(Smart Dust),主要用于微型低功耗节点自组网的研究,以计算机技术、通信系统和大规模集成电路制造技术作为技术基础,使其向节点微型化和网络实用化方向转化。传感器网络研究的早期到近代阶段采用的是声纳和雷达为主的节点类型,并且节点的体积

巨大,其组网方式主要采用有线方式。由于独立能源供电消除了能耗成为主要考虑问题的观点,加上网络既不是自组织网络,也不符合随机散布的特性。因此,虽然现在传感器网络研究仅仅是广义上的,但是这些研究中所取得的成就却为以片上系统、微机电技术和自组织网络技术为代表的现代无线传感器网络的研究打下了坚实的技术基础。

现在所说的无线传感器网络的研究始于 20 世纪 90 年代末,其代表性的研究项目有 SensoNet、WINS、SPINS、SINA 等,主要涉及的研究领域包括计算机、网络、半导体、通信、光学、微机械、化学、网络接入传感器、安全以及航天等方面。

我国现代意义上的无线传感器网络及其应用几乎和发达国家同步启动,并于 1999 年首次出现在中国科学院的“信息与自动化领域研究报告”中。2001 年,中国科学院依托上海微系统研究与发展中心,旨在引领中国科学院内部的相关工作。该中心在传感器网络方向上陆续部署了若干重大研究项目和方向性项目,并且其中的许多无线传感器网络的研究项目得到了国家“973”计划基金、国家“863”计划基金和国家自然科学基金等的积极资助。经过几年的努力,已经建立了传感器网络的研究平台,在无线智能传感器网络通信技术、微型传感器、传感器端机、移动基站和应用系统等方面取得了重大的突破。2004 年 9 月,在北京有对相关成果的大规模外场演示,并将部分成果应用到实际工程系统中。国内的许多高校如清华大学、西安电子科技大学、浙江大学、北京邮电大学等也掀起了无线传感器网络的研究热潮,进行了有关无线传感器网络的基础研究工作。一些企业如华为通讯股份有限公司等单位也加入了无线传感器网络的研究行列。

随着嵌入式技术、传感器技术、无线通信技术、现代网络技术和分布式信息处理等多种技术的飞速发展和日益成熟,在世界范围内开始出现具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器,由这些微型传感器组成的传感器网络逐步形成现在的研究热点。无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks)作为新一代的网络,无论是在国家安全,还是国民经济等方面均有着广泛的应用前景。

未来无线传感器网络将向海、陆、空一体化综合无线传感器网络的方向发展,最终将成为虚拟世界和现实世界的接口,不断深入到人们的日常生活中,就像互联网一样改变人们的生活方式。无线传感器网络是由分布在给定部分区域中的许多无线传感器节点组成的一种信息获取系统。在该区域中的每个传感器节点都具有感知功能,并且具有一定的计算能力。各节点之间信息的交流、汇集和处理主要通过专用的网络协议来实现,从而实现给定区域之间目标的跟踪、检测、识别和定位。

由于无线通信技术的高速发展,无线网络技术也随之发展起来。无线传感器网络就是其中的一个代表。无线传感器网络是集信息采集、信息处理、信息传输于一体的综合智能信息系统。WSN 融合了现代网络技术、无线通信技术、传感器技术、嵌入式计算技术的优点,节点采用特定协议自组成网,协同工作,被广泛应用于军事、环境监测、空间探索等领域。无线传感器的应用领域如图 1-1 所示。



图 1-1 无线传感器网络的应用领域

无线传感器网络的基本结构主要包括汇聚节点、传感器节点、中继网络（Internet 和其他网络）以及管理节点。

传感器节点是随机散布在监测区域中,通过自组织的方式构成网络,根据多跳路由的方式将监测到的数据传送到汇聚节点处理,

最后借助长距离或短距离临时建立的汇聚链路将整个区域内的数据传到远程中心。传感器节点主要负责对数据进行采集并且将其发送给汇聚节点，然后通过中继网络（互联网或者卫星）到达管理节点。用户通过管理节点对传感器网络进行配置和管理，发布检测任务以及收集检测数据。传感器节点通常是一个微型的嵌入式系统，由于每个节点通过电池供电，所以它的存储能力、处理能力和通信能力比较弱。同时，每个传感器节点利用路由器和终端功能，不仅能对所需的信息进行收集和数据处理，还可以对其他节点的数据进行管理、存储和融合等功能进行处理，并且能与其他节点协作完成某些指定的任务。

汇聚节点通常也称为基站，它通过中继网络如互联网、卫星或者移动通信网络等多种桥梁实现无线传感器网络和用户之间的通信，其信息处理能力、通信能力和存储能力都比较强。它既可以是一个功能强大的有足够能量和资源的传感器节点，也可以是没有监测功能而仅有路由功能的特殊网络设备。

无线传感器网络结构如图 1-2 所示。

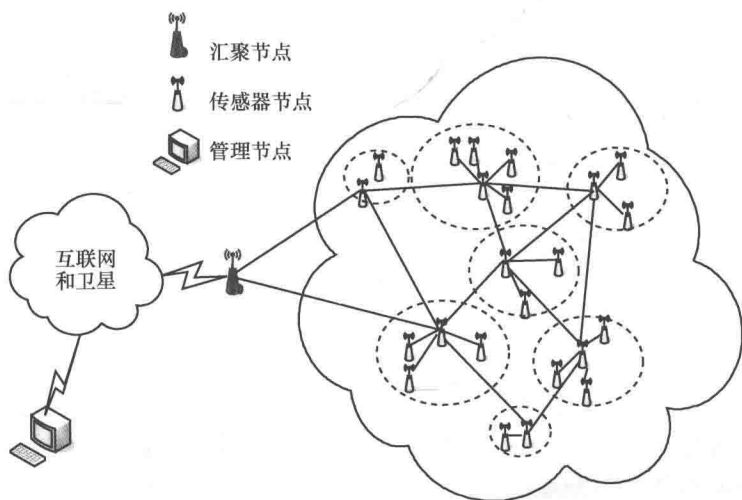


图 1-2 无线传感器网络结构

无线传感器网络具有网络节点数量大、密度高,节点有一定的故障率,节点内部局限性,网络拓扑变化快和以数据为中心的分布式控制等特点。

1.2 多址技术

随着网络通信业务的迅速增长,网络结构加速复杂化,所能使用的通信资源也越来越紧缺,多址通信技术在现代通信的作用日益凸显。在卫星通信、计算机通信、移动通信等通信网络中,当多个用户通过一个公共信道与其他用户进行通信时,就必须采用某种多址技术进行调度和协调。

多址技术是允许2台或2台以上的发射机通过一个公共信道发送信号的技术。多址通信技术在现代通信中起着重要作用。在卫星通信、计算机通信、移动通信等通信网络中,当多个用户通过一个公共信道与其他用户进行通信时,就必须采用某种多址技术。图1-3是多址信道的一个简单模型,该网络由 n 个用户和一个中心台组成。

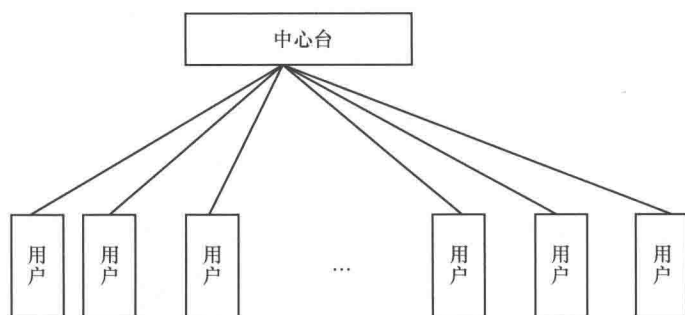


图 1-3 多址信道模型

按照信道资源的共享方式,多址技术通常又可以分为三类:固定分配多址(FAMA)、按需分配多址(DAMA)和随机多址,三者的关系如图1-4所示。

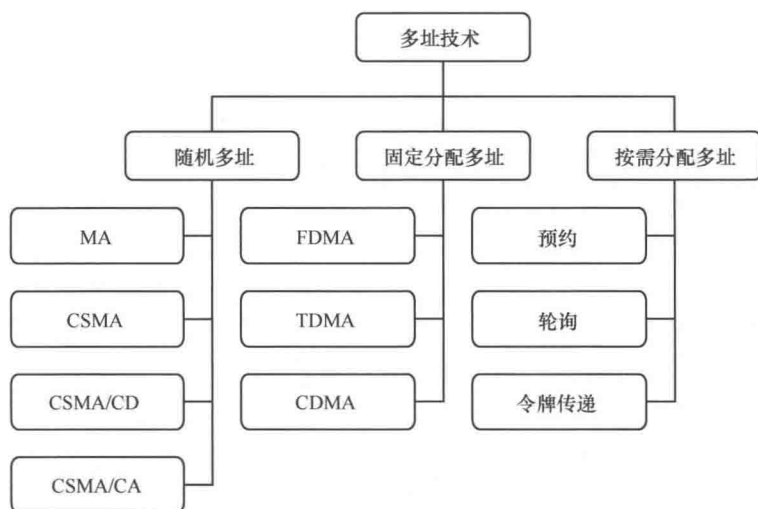


图 1-4 多址技术分类

1. 固定分配多址

3 种基本的固定分配多址技术是频分多址（FDMA，Frequency Division Multiple Access）、时分多址（TDMA，Time Division Multiple Access）、码分多址（CDMA，Code Division Multiple Access），它们的原则是把共享的一条信道分割成若干个相互独立的子信道，每个子信道又分配给一个或多个用户专用，适用于比较连续的流业务。因而所有面向语音的无线网络都采用固定分配信道接入或信道分割技术。固定分配方式的缺点是传输速率受到限制，并且基站的复杂性比较高。

2. 按需分配多址

轮询接入的原则是网络按某种循环顺序询问每个终端是否有数据发送，如果有则立即发送，否则网络立即转向下一个终端，这样各站点可以公平地获取信道访问控制权。轮询接入适用于通信业务量随时间变化，且这种变化又难以预测的情况。

按需分配方式为用户保留了带宽，网络根据用户业务的数据长度分配带宽，当用户处于空闲期时，分配给该用户的带宽将被分配