

高新技术专著系列

Cross-layer Design for Wireless
Communications
—From Principle to
Application

无线通信跨层设计 ——从原理到应用

张海霞 袁东风 马艳波 编著

- 科学的设计方法，否定之否定的发展规律和内在本质
- 打破了传统的分层设计思想，回归整体优化的设计思路
- 在“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项课题中，跨层设计已作为一种主要方法被提出

高新技术专著系列

Cross-layer Design for Wireless
Communications
—From Principle to
Application

无线通信跨层设计 ——从原理到应用

张海霞 袁东风 马艳波 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

无线通信跨层设计：从原理到应用 / 张海霞，袁东风，马艳波编著. — 北京：人民邮电出版社，2010.7
(高新技术专著系列)
ISBN 978-7-115-22781-2

I. ①无… II. ①张… ②袁… ③马… III. ①无线电通信—通信系统—设计 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第061999号

内 容 提 要

本书针对无线通信跨层设计这一研究热点，全面系统地介绍了无线网络中跨层设计的原理及应用，是一本关于无线通信网络最新理论与技术的专业书。本书以全新的视野，全面介绍了无线通信中主流的跨层设计方法，让读者在最短的时间内能够跟踪并掌握无线跨层设计这一新技术。

本书可供通信与信息系统、电子与信息系统、计算机网络等研究人员、相关专业教师、研究生以及高年级本科生参考使用。

高新技术专著系列

无线通信跨层设计——从原理到应用

-
- ◆ 编 著 张海霞 袁东风 马艳波
责任编辑 李 强
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本：700×1000 1/16
印张：13.75
字数：256 千字
印数：1 - 2 500 册

ISBN 978-7-115-22781-2

定价：58.00 元

读者服务热线：(010)67129264 印装质量热线：(010)67129223

反盗版热线：(010)67171154

前 言

随着下一代无线通信网络的飞速发展和业务需求的爆炸式增长，有限的无线资源与多媒体业务不断提高的服务质量（QoS, Quality of Service）要求之间的矛盾日益尖锐，使得既能提高网络整体性能又可以支持高速、高质量的多媒体业务的资源分配策略成为当前无线通信研究领域关注的重点。然而基于传统分层协议架构的资源分配策略是不能解决此矛盾的，于是打破传统分层思想的跨层设计方法应运而生，是下一代无线通信系统中的一项关键的理论创新。跨层设计方法将原来被割裂的网络各层作为统一的整体进行设计、分析、优化和控制，同时充分利用各层之间强烈的相关性信息，进行无线网络协议的整体优化。实际上，无线通信跨层设计概念自提出以来，便迅速引起了学术界和工业界的关注，并逐渐成为未来通信网络标准中的重要组成部分。

作者在自身研究工作积累的基础上精心编写了本书，以期待为有一定研究基础的本专业学者提供较为系统的理论和技术参考，并弥补国内此领域研究资源相对匮乏的状况。需要指出的是，由于跨层设计是近几年才提出的研究理论，到目前为止还未形成系统的框架，本书作者在书中除了阐述了自己的研究成果和观点外，还汲取了一些研究界其他学者的研究成果。

本书共分为7章，根据无线通信中跨层设计的最新发展，有重点地介绍了跨层设计的基本原理和主流设计理论。

第1章简要介绍了无线通信跨层设计的基本概念。从无线通信跨层设计的背景意义入手，讨论了跨层设计的基本原理及基本要素，并对现有的跨层设计方法进行了分类总结，最后给出了一些跨层设计方法的实例。

第2章重点讨论了多用户无线资源管理中基于博弈理论的跨层优化设计。首先介绍了博弈理论的基础知识，包括合作博弈理论、非合作博弈理论，以及混合竞争合作策略，接着介绍了竞争合作策略在多媒体无线资源管理及跨

层设计中的应用。

第3章介绍了基于有效容量理论的跨层框架。在此跨层框架基础上，分别分析了单信道和多信道通信系统中基于跨层联合优化并保证时延 QoS 的资源分配策略。

第4章基于链路自适应技术，综合考虑无线信道状态、QoS 满意程度、业务优先级、用户公平因子、队列状态等多层因素的跨层优化设计，基于此跨层设计分别讨论了基于 IEEE 802.16 无线城域网和认知无线电网络的无线资源调度算法。

第5章讨论了基于链路自适应的跨层设计，主要介绍了物理层的自适应编码调制技术、RC-LDPC (Rate Compatible Low Density Parity Check) 码和数据链路层的 ARQ (Automatic Repeat reQuest) 技术的联合优化。

第6章首先讨论了无线网络中传输层拥塞控制机制的研究现状，接着探讨了基于物理层信道状态并保证用户 QoS 要求的传输层拥塞控制机制。

第7章探讨了无线传感器网络中的跨层设计问题。介绍了4种具有代表性的无线传感器网络跨层设计体系框架，具体分析了基于物理层和 MAC 层的信息采集处理方案和基于虚拟 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 的数据传输方案。

本书部分章节内容根据以下项目的研究成果总结而成：国家自然科学基金项目《宽带无线通信网络的跨层设计》(No. 60672036)、山东省自然科学基金重点项目《多跳认知无线网络中的跨层优化理论研究》(No. Z2008G01)、国家自然科学基金重点项目《基于认知无线电的中继与协同通信研究》(No. 60832008)，在此一并对以上项目提供支持的人员和参与项目的相关研究人员表示感谢。

本书由山东大学宽带无线移动通信与传输实验室袁东风教授和张海霞副

教授组织编写并审校，参加本书编写工作的还有马艳波、管章玉、史斐谨、朱雪梅、田冲、梁泉泉、王倩等。尽管我们力求完美，但是由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

目 录

第1章

绪论

1.1 跨层设计的概念	2
1.2 跨层设计原理及基本要素	4
1.2.1 物理层	4
1.2.2 数据链路层	4
1.2.3 网络层	5
1.2.4 传输层	5
1.2.5 应用层	6
1.3 跨层设计的方法分类	6
1.3.1 按消息传递方向分类	6
1.3.2 按问题求解方法分类	7
1.4 跨层设计方法应用实例	7
1.4.1 基于博弈理论的跨层设计	8
1.4.2 基于有效容量的跨层设计	9
1.4.3 无线网络中基于反馈优化的设计	10
1.4.4 基于链路自适应的跨层设计	10
1.4.5 基于跨层设计的传输层拥塞控制机制	11
1.4.6 无线传感器网络中的跨层设计	12
参考文献	18

第2章

基于博弈理论的多用户多媒体无线资源管理

2.1	博弈理论概述	24
2.1.1	NBS	25
2.1.2	KSBS	26
2.2	基于讨价还价策略的网络多媒体资源管理	27
2.2.1	相关工作及研究背景	27
2.2.2	效用函数定义	28
2.2.3	凹凸性分析	29
2.2.4	基于 NBS 的资源管理策略	29
2.2.5	基于 KSBS 的资源管理策略	31
2.2.6	性能分析	32
2.2.7	小结	35
2.3	标量信道中的多媒体资源管理竞合策略	36
2.3.1	竞合理论概述及相关工作	36
2.3.2	基于 KSBS 的竞合策略	37
2.3.3	竞合策略举例	38
2.3.4	性能分析	39
2.3.5	小结	41
2.4	矢量信道中的多媒体资源管理竞争策略	41
2.4.1	多载波信道简介及相关工作	42
2.4.2	问题建模	42
2.4.3	基于用户分解的方法——两用户情况	43
2.4.4	基于用户分解的方法——多用户的情况	43
2.4.5	两用户加权速率和最大化方法	44
2.4.6	性能分析	45
2.4.7	小结	48
2.5	矢量信道中的多媒体资源管理竞合策略	48
2.5.1	基于多载波的认知无线电系统	48
2.5.2	数学模型	49
2.5.3	竞合策略的实现	50
2.5.4	性能分析	52
2.5.5	小结	56
	参考文献	56

第3章

基于有效容量的跨层优化理论

3.1	基于有效容量的跨层设计	60
3.1.1	信道模型	60
3.1.2	有效带宽理论	62
3.1.3	有效容量模型	63
3.1.4	基于有效带宽与有效容量的跨层设计	66
3.2	基于有效容量理论的功率和速度分配机制	67
3.2.1	系统模型	67
3.2.2	保证 QoS 的功率和速率分配机制	68
3.2.3	基于 MQAM 机制且保证 QoS 的功率和速度控制机制	72
3.2.4	信道相关性影响	76
3.3	多信道系统中保证 QoS 的功率和速度分配	
机制		82
3.3.1	系统模型	82
3.3.2	分集系统的优化问题	83
3.3.3	多载波系统的优化问题	84
3.3.4	MIMO 复用系统的优化问题	85
3.3.5	独立优化问题	86
3.3.6	复用系统的最优功率控制策略	86
3.3.7	数值结果分析	89
参考文献		92

第4章

无线网络跨层调度算法研究

4.1	概述	95
4.2	基于 IEEE 802.16 无线城域网的跨层调度算法	96
4.2.1	无线城域网概述	96
4.2.2	系统模型	97
4.2.3	跨层调度算法	100
4.2.4	小结	106
4.3	基于认知无线电网络的跨层调度算法	106

4.3.1 认知无线电概述	106
4.3.2 系统模型	107
4.3.3 基于系统性能联合优化的调度算法	109
4.3.4 基于最小性能保证的两步调度算法	117
4.3.5 小结	122
参考文献	123

第5章

基于链路自适应的跨层设计

5.1 基于链路自适应的跨层设计概述	126
5.1.1 链路自适应技术	126
5.1.2 链路自适应技术在跨层设计中的应用	126
5.2 基于 HARQ 的跨层设计	128
5.2.1 HARQ 技术	128
5.2.2 HARQ 技术在跨层设计中的应用	133
5.2.3 数据仿真及分析	138
5.3 基于 RC-LDPC 码的跨层设计	139
5.3.1 RC-LDPC 码	139
5.3.2 RC-LDPC 码在跨层设计中的应用	144
参考文献	146

第6章

TCP 拥塞控制机制跨层优化的研究

6.1 无线网络中 TCP 拥塞控制	149
6.1.1 TCP 在无线网络中的特点	149
6.1.2 无线网络拥塞控制技术	151
6.1.3 跨层优化技术应用于传输层的现状及面临的问题	155
6.1.4 跨层模型	156
6.2 无线环境下保证 QoS 的 TCP 拥塞控制机制	160
6.2.1 基本原理	160
6.2.2 可用带宽估计	161
6.2.3 TCP_VR 的算法	163
6.2.4 仿真结果	167

6.3 无线网络跨层拥塞控制中的功率效能控制	171
6.3.1 高效功率控制算法	171
6.3.2 性能分析	173
6.3.3 小结	175
参考文献	175

第7章

无线传感器网络中的跨层设计

7.1 无线传感器网络特点及跨层设计的意义	180
7.1.1 无线传感器网络特点	180
7.1.2 跨层设计在无线传感器网络中的应用	181
7.2 无线传感器网络跨层体系框架	183
7.2.1 传感协议(SP)	183
7.2.2 TinyCubus	184
7.2.3 Lu	185
7.2.4 Jurdak	186
7.3 基于跨层设计的无线传感器网络信源区信息采集方案	187
7.3.1 系统模型	188
7.3.2 融合算法	188
7.3.3 传输调度算法	192
7.3.4 小结	195
7.4 基于虚拟 MIMO 技术的无线传感器网络跨层设计	195
7.4.1 虚拟 MIMO 技术	195
7.4.2 系统框架和协议设计	197
参考文献	204

第 1 章
绪论

随着无线移动通信技术的普及和发展，用户对宽带数据业务的需求不断增长，特别是当前出现的对低时延语音和视频的需求，使得研究开发速率更高、时延更小、整体性能更优的新一代无线移动通信技术成为当前研究领域关注的重点。同时，无线通信的新技术不断涌现，如先进的信道编码、多天线技术（MIMO）、正交频分复用技术（OFDM）、链路自适应技术，特别是无线网络跨层设计思想的提出，使得提供高速宽带的无线业务成为可能。

跨层设计思想是下一代无线通信系统的一项关键的理论创新，该方法打破了传统的分层设计思想，将原来被割裂的网络各层作为统一的整体进行设计、分析、优化和控制，同时，充分利用各层之间的相关性信息，进行无线网络协议的整体优化。

1.1

跨层设计的概念

随着无线通信的不断发展，特别是多媒体需求的爆炸式增长，传统分层结构协议设计的弊端充分暴露了出来，跨层设计逐渐为人们所认识，并成为下一代无线移动通信技术发展的一项关键技术。但是，跨层设计并不是完全否定传统网络协议的分层模式，而是将网络各个子层的相关参数，通过层间交互信息进行统一协调，使得协议栈能够以全局的方式来对各个参数进行统一调度，从而实现对网络资源的有效分配，提高网络的综合性能。

跨层设计是从传统的分层结构的协议体系中发展而来的。图 1.1 给出了开放系统互联（OSI，Open System Interconnection）七层协议体系结构和 TCP/IP 五层协议体系结构。TCP/IP 是发展至今最成功的通信协议，它被用于当今所构筑的最大的开放式网络系统 Internet 之上。虽然这两种协议体系结构不同，但是其分层的思想是一样的，在此只对 OSI 七层模型进行详细阐述。在 OSI 七层模型中，由低到高分别是物理层（Physical Layer），数据链路层（Data Link Layer），网络层（Network Layer），传输层（Transport Layer），会话层（Session Layer），表示层（Presentation Layer）和应用层（Application Layer）。第一层到第三层属于 OSI 参考模型的低三层，负责创建网络通信

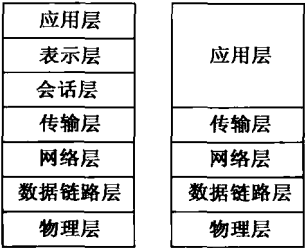


图 1.1 OSI 七层模型示意图和 TCP/IP 五层模型示意图

连接的链路；第四层到第七层为 OSI 参考模型的高四层，具体负责端到端的数据通信。每层完成一定的功能，直接为其上层提供服务。网络通信则可以自上而下（在发送端）或者自下而上（在接收端）双向进行。但是，并不是每一通信过程都需要经过 OSI 的全部七层，有的甚至只需要双方对应的某一层即可。这种分层结构最重要的特点是：通信只发生在相邻的两层之间。因此，这种分层体系结构只需准确描述相邻两层间的接口，具有较强的扩展性。

传统的分层网络协议对于有线网络是非常成功的，但是，在无线通信环境中，接入冲突、用户间干扰、信号衰落等情况远远比有线网络严重。在这种网络情况下，协议的分层结构存在两大问题。

① 非最优，分层的方法不允许在各层之间共享信息，而每层的信息都是不充分的，因此，分层设计的网络协议无法保证整个网络性能的最优化。例如无线网络中多跳路由技术，每一节点的通信都会对其他节点产生干扰，因此，在设计路由算法时必须要考虑物理层和链路层对路由的影响。

② 不灵活，在传统的分层方法中，网络协议要求能在最坏的情况下正常运行，没有适应环境变换的能力。这样，现有的协议栈无法灵活地适应无线移动环境的变化，从而只能基于通信条件最为恶劣的情况进行协议设计，进而导致了协议栈无法对有限的频谱资源及功率资源进行有效的利用。总之，有线网络不需要跨层设计是因为其传输媒质保证了各层之间可以只具有弱耦合性，而在无线网络中需要引入跨层设计机制^{[1]、[2]}。

跨层设计机制通过在协议栈的各层之间传递特定的信息来协调协议栈各层之间的工作过程，使之与无线通信环境相适应，从而使系统能够满足各种业务的不同需求。跨层设计的基本原理如图 1.2 所示。从图中可以看出，跨层设计的协议栈增加了一个叫做跨层设计模块的组件，该组件与协议栈的各层相连接，存储和协调各层的关键参数，使得信息能够在协议栈的各层之间传递，而不再将信息的

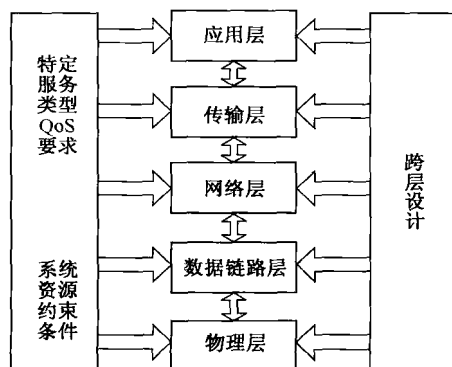


图 1.2 跨层结构示意图

传递限定在相邻的两层之间。其核心思想是网络中各层都不是单独设计，而是把所有层作为一个整体来设计。层与层之间的信息交互保证了协议能够根据应用需求和网络条件进行全局自适应变化，而且每层协议都可以在系统整体约束和整体性能要求下进行联合优化设计。

1.2

跨层设计原理及基本要素

在分析改善系统整体性能基础上，跨层设计的研究主要集中在不同层之间参数的选择、传递和优化。因此，各层的参数设置以及与相邻层的信息交互机制就构成了跨层设计的基本要素，下面分层逐个介绍。

1.2.1 物理层

物理层的功能是利用一定的发送方式使数据能够在一定的传输范围内以一定的错误概率接收到。物理层的传输参数主要包括：发送功率、误比特率及调制编码方式等。例如，在物理层与应用层之间，用户根据应用层中不同的业务对物理层的特性进行调整；多媒体业务可以根据其从物理层获得的信道状态信息对编码方式和速率进行调整。由此可见，经典的信源信道联合编/译码技术就是物理层和应用层跨层设计的具体实例。

在物理层与网络层之间，物理层的信道状态信息能够被网络层用来作为路由选择的依据。例如，网络层根据信道状态信息选择最优路由路径。在物理层与数据链路层之间，由数据链路层根据其控制机制需要发出的功率控制指令以及其他传输控制指令能够使物理层的性能得到改善。

1.2.2 数据链路层

数据链路层的功能主要包括：通过前向纠错（FEC）机制及自动请求重传（ARQ）机制实现数据的可靠传输；对移动终端接入信道的过程进行控制以减少或避免冲突；对数据帧进行封装以确保其在开销最小的情况下进行传输。能够被其他层利用的数据链路层信息主要包括：当前的前向纠错机制、重传数据帧的数量和长度、无线信道的可用时间信息、切换发起及完成的时间等。

在数据链路层与应用层之间，不同的应用业务有不同的 QoS 需求，数据链

路层需要根据相应的应用层业务需求对数据帧进行不同的处理；具有低时延需求的数据帧将得到优先处理，而可靠性需求高的数据帧在前向纠错和自动请求重传方面将得到更强的纠错编码及更多的重传次数。在数据链路层与传输层之间，当信道条件较差时，数据链路层的重传机制将引起较长的传输时延，这就会导致传输层的 TCP 连接超时，从而启动重传机制并且降低发送速率。为了避免出现这种情况，必须利用 TCP 的往返时间 (RTT) 及重传定时器 (RTO) 来控制数据链路层的重传机制。同样，数据链路层的重传机制也能够用来对 TCP 重传定时器的取值进行调整。在数据链路层与网络层之间，在移动终端改变子网位置时基于移动 IP 进行切换，以保证连续的通信。但是，移动 IP 的切换过程不可避免的将会引起时延，这是因为它是在网络层检测到网络的变化后而进行的切换，而利用无线信道信号强度这样的数据链路层信息将能够减少移动 IP 切换带来的时延。

1.2.3 网络层

网络层的功能主要是完成路由选择和寻址，确定传输数据分组的物理网络接口。在无线通信系统内，网络层协议主要为移动 IP，它能够对 IP 切换进行处理，从而保持移动主机与网络具有稳定的连接性。进行跨层信息交互时，网络层能够利用的信息包括：移动 IP 的切换信息及网络层目前正在使用的物理网络接口。

在网络层与应用层之间，无线设备能够提供不同的物理接口以支持不同的业务，在应用层提出请求时，网络层就需要根据应用层对 QoS 的不同需求，将数据分组路由到不同的物理网络接口上。在网络层与传输层之间，传输层可利用移动 IP 的切换信息来控制其定时器，从而避免不必要的重复重传。此外，传输层也可利用切换信息实现快速重传，从而提高传输层的吞吐量。

1.2.4 传输层

传输层主要负责端到端的连接控制，传输层 TCP 的信息主要包括：往返时间 (RTT)、重传超时时间 (RTO)、最大传输单位、接收窗口、拥塞窗口、数据丢失数量及实际吞吐量等。一方面，传输层协议会将因恶劣的无线信道状况引起的数据丢失理解为拥塞丢失，从而导致传输效率下降；另一方面，传输层协议会将切换带来的数据丢失及定时器超时解释为拥塞丢失，这些将导致 TCP 的吞吐量降低；所以需要利用从网络层、数据链路层以及物理层传递过来的信息来提高传输层协议的吞吐量。

在传输层与应用层之间，应用层能够将其 QoS 需求传递给 TCP 层。根据此信息，一方面，TCP 层能够调整其滑动窗口的大小，对于高优先级的业务，TCP 层可分配较大的滑动窗口尺寸，对于低优先级的业务，TCP 层可分配较小

的窗口尺寸；另一方面，TCP 能够将数据分组丢失率及吞吐量信息提供给应用层，应用层能够利用其提供的信息调整发送速率。

1.2.5 应用层

应用层是用户用来运行其应用业务的网络协议层。现有的应用都是面向有线网络发展起来的，这些应用在无线网络上无法高效地工作。因此，基于底层信息的应用业务将有助于提高其在无线网络中的性能。应用层应该能够向其他层传递其 QoS 需求，例如：时延范围、时延抖动、吞吐量及分组丢失率。从底层获得的信道状态信息则有助于应用层调整其工作方式，从而降低对带宽的需求。

1.3

跨层设计的方法分类

在进行跨层联合优化时，联合不同层或设置不同优化目标确定了不同的跨层优化设计方法，当前还没有统一的跨层框架和设计方法。但在目前的研究中已经提出了很多比较经典的设计方法，下面从消息传递的方向和问题求解方法两个角度分别介绍。

1.3.1 按消息传递方向分类

1. 自下而上的跨层设计机制

这种机制是控制系统中常用的反馈机制，发送反馈信息到高层以优化系统性能。底层提供状态指示信息，而高层根据底层传来的信息做出相应的决策。例如物理层的信道信息被反馈到数据链路层以控制其差错控制机制，或者反馈到应用层以调整其发送信息数据速率。由于这种跨层策略会引起延时和不必要的吞吐量降低，所以，不能对多媒体传输提供最优的控制策略。

2. 自上而下的跨层设计机制

在这种机制中，高层信息被直接传递到协议栈的底层，底层根据高层的指示信息调整自己的数据传输策略以满足高层的要求。例如 MAC 层通过调整物理层的功率控制策略控制传输距离，或应用层控制 MAC 层的接入策略或者数据帧长度等参数。

3. 综合跨层设计机制

综合跨层设计机制综合考虑了多层之间相互的信息共享，即在将上层的信息