现代通信网络技术丛书

多址通信及其接入控制技术

聂景楠　编著

人 民 邮 电 出 版 社

图书在版编目（**CIP**）数据

多址通信及其接入控制技术 / 聂景楠编著．—北京：人民邮电出版社，2006.6
（现代通信网络技术丛书）

ISBN 7-115-14732-9

Ⅰ．多… Ⅱ．聂… Ⅲ．通信网—通信技术 Ⅳ．TP915

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 037310 号

内 容 提 要

本书系统地归纳和总结了通信网络中多个用户、多种业务共享/分配通信资源的一般原理、技术和实现方法，论述了 FDMA、TDMA、CDMA、ALOHA、CSMA、PRMA 等各类网络接入方式的特点及其在通信网络中的应用，介绍了 Ad hoc 网络、GSM 系统、IS-95 系统、卫星通信网、高速 CDMA 数据系统、IEEE 802.11、蓝牙、IEEE 802.16 等新型通信网络中的接入控制技术。在论述方法上，本书首先阐述接入技术的一般原理，然后分析各种接入协议的性能和特点，最后介绍各种接入技术在实际通信网络中的应用。书中既有对成熟接入技术的归纳和概括，又包含了一些作者通过自身相关的科研实践得到的体会并对之进行的总结，还对近年来出现的一些新兴技术进行了介绍，内容丰富，深入浅出。

本书可以作为高等院校通信与信息系统、计算机应用技术等专业研究生的教材或者参考书，也可供通信技术和网络领域中从事教学、科研、开发、应用的教师、科技工作者阅读参考。

现代通信网络技术丛书

多址通信及其接入控制技术

◆ 编　　著　聂景楠
责任编辑　杨　凌

◆ 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
北京鸿佳印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本：787×1092　1/16
印张：15.75
字数：382 千字　　2006 年 6 月第 1 版
印数：1 – 3 500 册　　2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-14732-9/TN・2766

定价：33.00 元

读者服务热线：（010）67129258　印装质量热线：（010）67129223

前　言

现代通信和网络技术正在飞速发展，由此催生了多种新型的通信系统和网络。为了让读者学习、了解这些知识，许多书籍都对相关技术进行了描述和介绍。然而，目前多数书籍在叙述思路和方法上显得雷同，差异性不强。许多读者虽然阅读了内容相同的多本书，却发现原来自己明白的部分依然明白，而原来不理解的内容仍然不理解。

本书从新的角度讨论了通信系统和网络技术中的一些热点课题，以多址通信和信道接入技术为视角，描述了通信系统和网络的概念、关键技术、存在的问题以及可能的解决方法，从一般理论到具体实践，系统地介绍了多址通信及其接入技术的原理和应用。

对于通信系统和网络，大多数现有书籍是从业务或功能分类等高层入手进行概括和描述的，如移动通信系统、卫星通信系统、计算机通信网络等，这类书籍无疑对于读者的学习和认知是必要的、有益的。然而，在此基础上，如果换个角度重新审视和认识相应的技术或系统，读者则可能对这些技术获得更进一步的、深入透彻的理解。多址通信和信道接入技术主要是从低层接入和传输的角度讨论通信系统网络实现方法的。多个用户（站）、多种业务接入网络时既要求能够可靠地相互连接，又必须实现高效、合理的通信资源共享（分配），这是本书讨论的中心问题。将此问题扩展开来，从一般的概念、原理到算法的性能分析和讨论，再到多址通信及接入技术在具体系统中的应用实践，这便形成了本书的叙述思路。

已有的研究表明，多址通信中的接入技术对通信系统和网络的影响是极其深刻的。在系统容量、网络性能和信道利用率等方面，多址接入技术常常被认为是通信系统和网络设计的关键。曾几何时，CDMA 技术几乎成了 IS-95 系统的代名词，CSMA/CD 也几乎与局域网等同起来。理清这些术语的概念和相互关系对于认识各种新型通信系统和网络十分必要。读者可能已经习惯于“从通信系统看所使用的接入技术”，而本书主张的“从接入技术看通信系统”更便于对不同的系统进行横向比较，更便于归纳和总结其一般的规律及实现方法，更有益于对现代通信系统和网络本质的理解和掌握，有益于设计和开发新的系统。

全书共分为 11 章。第 1 章介绍了多址通信和信道接入技术的基本概念和功能，它们在网络通信中的作用以及研究内容和方法；第 2 章和第 3 章分别描述了两类基本的多址接入方法：固定分配方法和动态分配方法，及其各自的应用环境和特点；第 4 章对第 2、3 章进行了扩展讨论，介绍了扩频多址接入技术以及 Ad hoc 网络的接入方法；第 5 章和第 6 章从多址接入方式的角度分别介绍了数字移动通信系统 GSM 和 IS-95；第 7 章重点介绍了第三代移动通信系统（3G）支持高速分组数据业务时所采用的增强接入技术；第 8 章讨论了卫星通信中的接入技术应用；第 9 章分析了有线和无线局域网系统中接入方法的应用特点；第 10 章从网络接入的角度介绍了蓝牙系统的原理和实现方法；第 11 章介绍了宽带无线城域网标准 IEEE 802.16d 的概念和多址接入方法。

本书既有对许多成熟多址通信接入技术的归纳和概括，又包含了一些长期以来作者通过相关教学科研实践得到的体会并对之进行的总结，另外还对近年来出现的一些新兴技术进行了介绍，内容丰富，深入浅出。

在完成本书的过程中，孙诗东、张国清提出了许多建设性的意见，对形成最后书稿做出了重要的贡献；张静、曾宏辉、姚远也以多种方式为本书做了有益的工作。对此，作者向他们表示深深的谢意。

本书的编写得到了解放军理工大学通信工程学院领导和相关部门的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间限制，加之作者水平有限，书中错误或者不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作　者

于南京解放军理工大学通信工程学院

目　　录

第 1 章　绪论 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　通信网络技术 …… 2
1.3　网络多址接入与接入网技术 …… 4
1.4　多址接入原理与实现方法 …… 7
1.5　本章小结 …… 17
1.6　思考与练习 …… 18
第 2 章　固定分配接入方法 …… 19
2.1　固定分配接入技术概述 …… 19
2.2　FDMA 原理及实现 …… 19
2.3　TDMA 原理及实现 …… 21
2.4　FDMA 与 TDMA 性能比较 …… 23
2.5　CDMA 原理及实现 …… 25
2.6　固定分配方式的性能 …… 27
2.7　固定分配接入方式的应用 …… 33
2.8　本章小结 …… 35
2.9　思考与练习 …… 35
第 3 章　动态分配接入方法 …… 37
3.1　动态分配接入技术概述 …… 37
3.2　基本的随机接入方法 …… 37
3.3　基于侦听的随机接入方法 …… 41
3.4　按需分配动态接入方法 …… 50
3.5　基于预约机制的动态接入方法 …… 52
3.6　动态分配接入方式的应用 …… 59
3.7　本章小结 …… 60
3.8　思考与练习 …… 61
第 4 章　多址接入相关问题的进一步讨论 …… 62
4.1　概述 …… 62
4.2　影响竞争式随机接入方法的因素 …… 62
4.3　扩频多址接入 …… 67
4.4　Ad hoc 网络接入控制方法 …… 72
4.5　本章小结 …… 86
4.6　思考与练习 …… 87
第 5 章　GSM 系统与 TDMA …… 88
5.1　多址接入技术的应用 …… 88

5.2 GSM 系统概述 …… 88
5.3 GSM 系统的 FDMA/TDMA 接入 …… 89
5.4 GSM 系统的逻辑信道及连接建立 …… 94
5.5 本章小结 …… 98
5.6 思考与练习 …… 98
第 6 章 IS-95 系统与 CDMA …… 99
6.1 IS-95 系统概述 …… 99
6.2 IS-95 系统的码分多址接入（CDMA） …… 99
6.3 IS-95 系统的数据链路层处理 …… 107
6.4 本章小结 …… 111
6.5 思考与练习 …… 112
第 7 章 CDMA 高速数据传输技术 …… 113
7.1 概述 …… 113
7.2 HSDPA 的概念和特点 …… 114
7.3 HDR 的基本原理 …… 117
7.4 本章小结 …… 140
7.5 思考与练习 …… 141
第 8 章 卫星通信中的多址接入 …… 142
8.1 卫星多址通信概述 …… 142
8.2 卫星信道的固定分配接入方式 …… 143
8.3 卫星信道的动态分配接入方式 …… 150
8.4 本章小结 …… 152
8.5 思考与练习 …… 152
第 9 章 局域网的接入与传输 …… 153
9.1 局域网概述 …… 153
9.2 有线局域网技术及实现 …… 154
9.3 无线局域网技术及实现 …… 158
9.4 本章小结 …… 169
9.5 思考与练习 …… 169
第 10 章 无线个人区域网与蓝牙 …… 171
10.1 概述 …… 171
10.2 蓝牙的体系结构 …… 172
10.3 蓝牙的物理信道与链路 …… 175
10.4 蓝牙的分组与信道控制 …… 177
10.5 本章小结 …… 200
10.6 思考与练习 …… 201
第 11 章 宽带无线接入与 IEEE 802.16 …… 202
11.1 概述 …… 202
11.2 MAC 层的功能与实现 …… 205

11.3 单载波方式物理层实现 …… 217
11.4 OFDM 与 OFDMA 物理层实现 …… 227
11.5 本章小结 …… 231
11.6 思考与练习 …… 232
参考文献 …… 233
缩略语 …… 236

第1章 绪 论

1.1 引 言

进入 21 世纪以来，通信技术得到了飞速发展，极大地影响了人们的日常生活和工作，也有力地推动了社会经济、文化等诸方面的发展，而这种发展反过来又对通信技术的进步提出了更高的要求，形成了更大的动力。现代通信技术发展的重要特征是数字化、网络化和高速（宽带）化。

从公众电信系统提供的信息传输服务看，有线电话、移动电话、卫星电话、多媒体传输等绝大多数业务都实现了或正在实现数字化；在日常活动的信息交互中，数字照相机/摄像机、数字存储媒体、数字电视等应用已经广泛地融入了人们的生活和工作；在经济生活中，各种通信设备的控制方式正在智能化，而智能化的前提便是数字化。通信技术的数字化涵盖了信息的数字化表示、数字存储、处理和传输，是其飞速发展的基础和前提。渐渐地人们已经习惯于各种数字技术日新月异的发展，并且在许多方面，已经开始习惯于将数字处理作为理所当然的技术应用而加以讨论。

网络化是现代通信技术发展的另一个特征。20 世纪 90 年代以来，网络技术从用于科学研究中的资源共享，逐渐开始走向社会商用，正在悄悄地改变着人们的工作和生活方式。以互联网为代表的网络应用为通信技术的发展注入了生机和活力，并成为通信技术的重要研究内容和新的发展方向。从功能上看，互联网只是构造了一种网络应用，而承载这一网络应用则需要一个强大的网络信息传输平台。在设计这一网络传输平台的过程中，需要将计算机网络技术和通信网络技术两者结合起来，因而充满新意，也充满挑战。

高速（宽带）化是通信技术关注的重要方面，也是网络传输平台研究的关键内容。由于受到信息数字化以及通信业务多元化的影响，高速信息传输成为现代通信技术发展的必然要求。在通信资源（带宽/时间/功率）确定的条件下，提高传输效率是高速信息传输的根本途径，尤其在无线传输环境下，通信资源的利用效率是通信技术水平的核心评价依据。

多址接入控制技术是网络传输平台技术（简称网络技术）的一部分，它的实现方法将直接影响到网络的吞吐效能、时延特点、业务能力、用户支持数量、资源利用效率等多方面性能，其研究基础是信息的数字传输和处理，其目标则是在网络中提高通信资源的使用效率。因而，现代通信网络的多址接入技术正是围绕着通信技术的数字化、网络化和高速化这三个特征展开的，其发展过程也展示了通信网络技术不断进步的过程。

从 20 世纪 80 年代末开始，码分多址（CDMA）一词吸引了通信技术领域众多专家的目光，也受到了业界的普遍关注。从不太熟悉，到引起争议，再到获得认可，一项用于蜂窝数字移动通信网络的技术十多年来发展的历程，揭示了接入控制技术对多址通信的重大影响。事实上，CDMA 只是众多网络多址接入技术中的一种，它有其独特的优点，也存在一定的不足，和其他接入控制技术一样，它也有着特定的应用场合和范围。然而，进一步的问题是：

CDMA 在新的、未来的通信网络中能够起什么样的作用？其他的接入控制技术在通信技术发展过程中将起到怎样的作用？接入控制技术在多址通信技术中究竟有着怎样的一般原理和应用机制？如何设计新的多址接入控制技术？等等。回答这些问题，就要求我们对现代通信网络的接入控制技术做出归纳和整理，通过具体的多址通信实例加以说明，在此基础上概括出可以进一步演绎的原理和技术。这正是本书所要讨论的主要内容。

1.2 通信网络技术

论述通信网络技术可以有多种不同的视角。从支持的各种应用和服务的角度看，典型的通信网络有电信网络、计算机网络、有线电视网络等，这些网络因提供的业务不同而可能有不同的架构和实现方式；从网络形成的拓扑层次和逻辑功能来看，通信网络又常被划分为接入网、核心网和骨干网等 3 个或多个层次，不同层次的功能不同，所采用的网络技术也不相同；另外，在一些专门的著作和学术论文中，网络技术也常常指的是分层协议参考模型中网络层所使用的技术。为了便于深入讨论多址通信及其相关课题，本书中将把涉及到信息传输的网络连接、链路保障和物理传送都归为通信网络技术，实际上，它指的是完成网络节点之间通信所需要的网络信息传输平台技术。如果套用开放系统互联（OSI）协议栈模型的话，网络传输技术涵盖了其中最低三层所涉及的技术，如图 1.1 所示。



图 1.1 一般通信网络的协议栈参考模型

根据 OSI 协议栈参考模型，网络节点之间的通信过程可由 7 个层次的协议功能进行逻辑概括，其中最低三层主要完成网络中节点之间信息的传输承载以及路由和转发。事实上，考察计算机网络、综合业务数字网（ISDN）、ATM 网络、移动通信网络等，可以注意到，虽然各种通信网络提供的应用和业务可能各不相同，但在信息传输承载的逻辑功能方面都是类似的，这便是通信网络技术所实现的核心功能。

通信网络技术的具体内容要根据各协议层完成的功能来决定。

就物理层而言，其主要功能是完成点对点的数字信号传输。实现数字信号传输功能的技术包括有调制解调技术、信道编解码技术、收发同步技术、物理帧格式定义，还有补偿信道畸变所采用的多种技术，如信道估计、信号均衡等。物理层的传输效能是网络技术实现的基础，较高效能的物理层传输无疑有利于整个网络资源的优化。然而，物理层通常只关心给定信道（带宽）的信号传输情况，这常常只是网络通信资源的一部分，因而物理层传输是通信网络技术的重要组成部分，但并不是全部内容。

近年来，在物理层传输技术领域的研究取得了多方面的突破和进展。扩频传输技术从军用走向民用，在数字移动通信系统（尤其是第三代移动通信系统）的设计中取得了巨大的成功；正交频分复用（OFDM）以及多进制调制解调技术（如 M-QAM）在高速数据传输应用中发挥了重要作用，广泛地用于有线宽带接入（xDSL）、无线局域网（IEEE 802.11a/g）、无线宽带接入（IEEE 802.16）等系统中；新型信道传输模型（如 MIMO）以及新型信道编解码技术（如 STC）也正在准备用于多种类型的新一代通信网络和系统（如 B3G、IEEE 802.16）中[9-11]。物理层传输技术的进步有力地推动了通信网络技术的发展，同时也为多址通信技术的研究奠定了更为坚实的基础。

对于链路层来说，它的主要功能首先是给一部分物理层传输的二进制数字信息（如链路帧的控制部分）赋予必要的含义。比如根据编码和数据格式定义所谓的节点地址、控制命令、数据块长度以及其他标识等。在此基础上，通过处理控制部分，对节点占用信道资源的过程实施调度、管理和控制，实现节点发送信息对信道的合理、有效使用。链路层技术包括多个节点（或用户）共享信道所需的复用机制、资源分配算法等，这种机制和算法不仅应该能够区分用户节点，而且还应该能够区分业务的种类。由于链路层的控制部分已经有了预先确定的意义，这部分内容的完整性和正确性理应得到验证，因而出现了 ARQ 技术、流量控制技术、节点到节点可靠性保障技术等；为了保证链路连接的有效性和可靠性，有时还需要设计一些控制信息的交互规程，这在电信术语中也常称为信令技术。物理层技术关心的是一对节点之间通信传输的有效性和可靠性问题，而链路层技术则将这一问题提升到了网络层面，所关注的是众多节点（或用户）对网络中整体通信资源的使用是否有效，是否可靠，能够在怎样的水平上达到有效性和可靠性的平衡或折衷。链路层中的接入控制技术对这些问题将做出回答。

作为链路层设计的成果，CDMA 技术已经很好地应用于数字移动通信系统，尤其是第三代移动通信系统（3G），TDMA 技术也得到了进一步发展。另外，在优化数据业务接入协议的过程中，多种基于 CSMA 的接入协议和算法被开发出来，可以用于多种专用的数据业务传输网络，极大地促进了无线数据应用的发展。同时，一些新的、与物理层结合紧密的多址方案（如 OFDMA）也正在研究当中。

网络层的主要功能是让源节点发出的信息能够正确地到达网络中的目的节点。如果只在直接连接的节点之间（比如有线网络的一跳范围或无线网络的单跳覆盖范围）实现这一功能，显然并不复杂。但一般网络中的节点之间常常并无直接连接，需要中间部件进行数据转发，此时实现信息的传递需要两类技术机制：一类是在途经的相关中间部件上建立可达路径的转接信息表（简称路由表）所采用的技术，另一类是根据路由表进行数据信息转发的技术。根据每一类技术不同的实现机制，形成了所谓的面向连接的网络通信技术以及无连接网络通信技术。在面向连接的技术中，路由表是通过发起通信的用户启动信令交互过程来建立的，中间部件（通常是交换机）中的路由表只是一些电路连接标识号在入口、出口通道上的映射，而数据信息的转发过程就是依照路由表实施的通道转移（交换）过程。面向连接的网络层通信技术是电信服务商采用的基本技术，它具有服务质量保证能力，以及便于管理、控制和计费的特点，是提供商业服务的基础。在无连接网络技术中，路由表通常是由中间部件（此时是路由器）自行运行路由协议，通过邻居发现、信息更新而建立的，无需用户通信前的信令交互。路由表是网络地址（或用户地址）在路由器入口、出口通道上的映射，而数据信息的转发则是依照路由表实施的数据包向出口的传递过程。无连接技术是计算机网络通信的重要特色。目前最重要的无连接网络层技术是基于 IP 的技术，它实现简单，无需集中控制以及复杂的信令交互过程。近年来互联网应用的极大成功有力地推动了基于 IP 的网络层技术的发展。

在通信网络技术中，多址接入的实现主要涉及到通信网络参考模型中链路层的一部分。考虑到多址接入方法与物理层传输机制密切相关，同时也会对网络层设计产生影响，因此联合的跨层设计是优化多址接入协议设计的重要手段。本书的讨论重点是网络传输技术中的数据链路层设计，同时也要对相关的物理层和网络层作必要的介绍。

1.3 网络多址接入与接入网技术

1.3.1 网络多址接入技术的特点、功能与应用

网络多址接入技术在一些著作和文献中也称为多址通信技术，通常是指网络中多个节点（或用户终端）共享通信信道资源实现连接访问的技术。为了实现网络互联，不同的用户节点只能通过公用信道相互联系。由于这种接入或访问网络的过程实际上表现为占用网络中传输信道的过程，因而相应的技术也常称为信道接入技术。具体地看，传输信息的信道可能是各种传输媒体，如有线电缆、光纤或无线链路等，故也称为媒体接入技术。在本书中，上述多个术语表达了相同的概念，因此将不加区分地使用。

当网络的通信资源提供给多个用户共同使用时，需要采用多址接入协议进行调度和协调。网络之所以采用共享通信资源的方式而不是让每个用户独享资源，主要基于两个原因：（1）所使用的通信资源十分紧缺或较为昂贵，共享方式有利于提高资源使用的效率；（2）节点用户之间需要进行通信，如果某些用户使用的资源不能被其他用户访问，那么相互之间的通信连接则不可能实现，采用共享方式可以在用户之间保持高度的可连接性。

多址接入（Multiple Access）技术的研究一般受到三个方面因素的约束和影响：第一是网络所支持业务的要求；第二是系统所拥有的网络通信资源情况；第三是网络所工作的信道和环境。

（1）业务需求的影响

一般来讲，多址接入协议和算法应该满足网络业务特点对传输的特殊要求。网络业务特点通常指信息流对时延的敏感程度、信息流的突发性（峰值速率与均值速率之比）以及通信建立方式（面向连接或无连接）等方面。比如，语音业务是一种实时业务，速率恒定，且具有一定的端到端时延要求。在网络的用户之间传输语音业务时，需要能够实时地接入网络并连续地传输。为了满足语音传输的要求，接入协议往往首先通过信令交互，获得通信资源的使用权，建立起所需的电路连接，然后再以占用固定通信资源的方式实现信道接入。再如，数据业务一般具有明显的突发特点，即峰值速率远大于平均速率，而对传输的实时性却要求不高。在网络支持数据业务时，接入协议通常会利用这些特点动态地分配通信资源，使资源的利用效率达到最优。

具体的多址接入方法通常用相应的协议或算法来描述。在设计中，首先需要了解系统所支持的通信业务有哪些特点和要求，诸如具体的业务类型、通信业务的延时和差错概率要求、信息流的数据速率特点以及是否采用面向连接的通信机制等。然后在了解通信业务要求的基础上，选择通信资源的分配控制方式。可以采用固定分配接入方式为每个用户或用户的每个连接分配确定的通信资源，也可以采用动态分配接入方式依据通信业务的即时需求进行通信资源分配。最后，无论采用哪种分配方式，都需设计相关的分配调度算法，执行通信资源的分配和调度，实现多个用户（终端）对通信资源的占用和共享。

在多址接入协议的研究中，有两种策略可以选择：第一种是业务针对性策略，即根据某种专门的通信业务要求，设计特定应用环境中的多址接入协议和算法；第二种是业务通用性策略，即在某种特定应用环境中设计能够支持多种通信业务要求的多址接入算法。前者通常

具有更高的通信资源利用效率，而后者则通过牺牲一定的资源利用效率，获得更为通用的业务支持能力。无论采用哪种策略，合理的平衡与折衷都是这一课题研究中贯穿始终的原则，因而也使得这一课题充满了吸引力和挑战性。

（2）通信资源的影响

通信资源主要指信息传输所能够使用的时间/所占用的频率带宽，以及信息传输时所发送的功率等。不同特点的业务对通信资源的占用情况也不尽相同，有时甚至可能大相径庭，而这既是多址接入方法的设计基础和依据，又是重要的设计目标。多址接入技术所要完成的任务是：根据不同的通信业务要求设计不同的通信资源使用策略，实现有限通信资源条件下尽可能高效、优化的资源分配或共享，同时保证一定的通信质量。换言之，多址接入技术要达到的目标就是在保证一定的信息传输质量的基础上，尽可能提高通信资源的利用效率。因此，多址接入方法的设计将显著地影响到通信系统的容量、性能和信道利用率。

在多址接入设计中，影响通信资源使用效率的两个基本问题是：第一，通信资源应该采用什么样的分配方式。选用的分配方式与通信业务要求密切相关，一定的通信业务要求通常选择与之相适应的分配方式，这样有利于提高和优化通信资源的使用效率。第二，如何设计实现一定分配方式下的调度算法。该算法将决定多址接入协议的实现复杂程度。

实际上，多址接入技术研究的核心问题是通信资源分配协议（或算法）的优化设计，而实现优化目标所附带的约束条件则通常是所要求的信号传输质量。这样，可以稍进一步地将多址接入协议的设计目标具体化：在信号能以给定误码率（或解调信噪比）解调复原的条件下，通信资源应该让尽可能多的用户所共享，或者用来支持尽可能高的数据速率。所以，多址接入协议实际上就是通信资源的分配方案和算法。

从通信系统的体系结构模型来看，多址接入协议主要是第二层即数据链路层需要研究和设计的内容，多址协议的优劣对各种通信业务的支持，以及物理信道的使用效率都有重要的影响。多址接入技术的挑战性体现在两个方面：第一，由于不同的通信业务、不同的信号处理技术对通信资源的分配方案有着不同的影响，寻求一种通用的、最优的、可实现的分配方案非常困难，因而出现了各种应用环境下不同的多址接入协议。既便如此，人们依然不断努力，希望寻求通用性更好、适用性更强的多址接入协议；第二，由于多址接入协议的算法本身也需要占用通信资源，而且越是成功的、优化的协议算法，占用的通信资源也就越多，因此，如何在协议实现功能的最优和耗费资源的最少这两者之间进行折衷，也一直是人们研究的重点。

（3）工作环境的影响

多址通信的环境也是多址接入协议设计的一个重要约束条件。典型的信道环境有卫星信道环境、地面信道环境和局域网信道环境。这三种环境具有不同的信号传输特点，通常也有着不同的接入协议设计结果。

卫星信道环境中，网络中用户节点之间的通信一般是通过卫星转发器进行转发的，卫星转发器位于地球上空的卫星轨道，具有长距离的通信能力，它接收所覆盖区域内地面站发送的信号，并进行转发。卫星通信的特点是节点用户的全连通和可以多目标寻址。卫星信道环境中最重要的参数是传输延时，典型值约为 0.25s，这通常比一个数据块传输单位（分组或包）的时间长度还长，因而对通信资源的分配技术、差错控制情况以及流量控制方法等都会产生影响。

在地面无线电波传输环境，传播延时通常比分组传输时间小，因此在通信资源的控制管理方面具有更好的条件。但是需要区分开两类网络：直接全连通的网络（也称为单跳网络）和信号（功率）只能覆盖部分节点的非全连通网络（也称为多跳网络）。显然，多跳网络的全局控制操作和资源分配要困难得多。无论如何，网络的多址接入方案和控制机制应当适应这些环境。另外，无线（移动）通信中存在多径影响，有时也要求一些特殊的信号设计方案，如扩频信号传输、正交频分复用（OFDM）传输等。地面无线电传输的另一个问题就是无线频谱的利用效率，通常物理层关心的是在给定信道资源上如何通过调制、复用等技术手段实现信息的高效传输，而网络多址接入控制协议则在此基础上设计多个用户的信道分配算法，通过众多节点用户对整个网络通信资源的动态复用，提高通信资源的使用效率。

对于局域网络通信系统，信道环境又有所不同。在这种环境下，信号传输距离短、数据速率高是其主要特点。局域网大多为专用网络，通常使用简单的拓扑结构和便宜的连接接口，这样就便于提供更大的灵活性，同时满足环境的可变性，进而达到所需的可靠性水平。多址接入协议所要解决的问题是：尽可能高效地让独立的用户共享高速宽带信道。

通常，对于多址接入协议的性能评估主要集中在以下方面：① 网络是否具有更高的信息吞吐速率和更低的信息传输延迟性能；② 网络能否同时支持不同的业务类型、不同的优先级别以及可变的消息长度；③ 在不同的延迟约束下，可否通过静态或动态复用达到更高的带宽利用效率；④ 是否有合适的操作控制方案和良好的稳定性、错误不敏感性。

到目前为止，多址接入技术研究已经取得了相当的成果，而且许多成果已经用于各种具体的通信网络和系统之中。除了 CDMA 技术成功用于第二代和第三代移动通信系统外，基于 CSMA 技术的各种多址协议也正广泛地用于支持数据业务的多种网络中，一些新的多址接入技术，如 OFDMA 等，也正在考虑用于新的高速通信网络。另一方面，一些新兴的通信网络也对多址接入技术提出了更高的要求，比如支持多种应用的 Ad hoc 网络、无线宽带网络、B3G 等，这都将使多址接入技术的研究不断地走向深入。

1.3.2 接入网技术

接入网络与网络接入技术的概念并不相同，其差别是：前者表明用户是通过接入设备（可能是交换设备，也可能是复用或集中控制设备）接入到网络中的，即每个要访问网络的用户经由一个“专用接口”实现其接入，接入网是一个具体的物理子网，如图 1.2 所示。而后者是指用户通过独立地访问一个公共的通信资源（某一公共媒体或信道）接入到网络中的过程，即用户通过对共享通信资源的使用实现接入网络，或完成用户之间的信息交换。

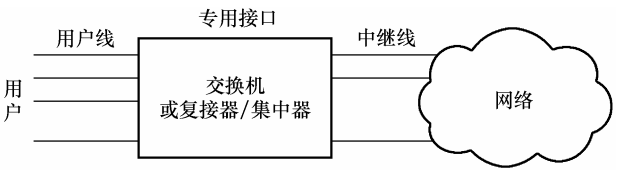


图 1.2 用户通过“专用接口”接入网络

正如 1.3.1 小节所述，网络接入技术的实例有很多，比如，在移动通信网络中，众多用户共用某一预定的频段进行信息交互的技术；在全连接的卫星通信网络中，用户也是通过网

络接入技术实现连接和通信的；在计算机局域网络中，多个用户是通过公共信道（电缆或集线器）的共享技术实现信息交换的，等等。

接入网技术是指“专用接口”中交换机或复用/集中控制设备组成网络所使用的协议或接口技术。接入网实际上是通信网络划分层次功能后具有一种特定功能的网络。从提供服务所形成的网络拓扑层次和功能来看，通信网络常被分为用户驻地网、接入网、核心网和骨干网等多个层次，不同层次的功能不同，所采用的网络技术也不相同。在固定电话网中，用户网络接口（UNI）和业务节点接口（SNI）之间定界的网络可称为接入网，主要由本地交换机用户接口提供支持。在移动通信系统中，基站至移动终端的网络称为无线接入网。

1.4 多址接入原理与实现方法

多址接入协议可以从通信资源的分配机制、实施分配算法的控制方式以及算法协议对变化需求的适应程度等方面描述。资源分配机制可以是静态的，即资源在使用过程中保持固定大小的占用；也可以是动态的，即资源在使用过程中可以根据需要动态调整。控制方式可以是集中式的，由控制点实施调度；也可以是分布式的，由各节点独自执行一个分布式算法实施控制。文献【13】将多址接入协议分为五类：（1）固定分配技术：以静态的方式将通信资源分配给用户，分配过程与用户的激活状态无关；（2）随机接入技术：整个通信资源作为一个公用信道提供给所有网络用户，每个用户通过随机的方式接入信道，由于存在着不同用户之间的接入冲突，网络接入性能较差，但可以通过限制接入时刻，或在传输之前进行信道侦听的方法来加以改进；（3）集中控制的动态分配技术：通过用户与集中控制部件之间的控制信息交互，明确资源需求情况，然后由控制部件进行动态资源分配和管理；（4）分布式动态分配技术：用户自行发布资源需求信息，并根据了解到的当前资源占用情况各自执行一个分布式算法，控制自己是否或何时占用通信资源；（5）自适应策略和混合模式：将前几种技术混合使用，并采用自适应的方法进行选择，使通信资源的使用达到最优。

这种划分方法较为具体，但概括性不够强。从更为一般的角度考虑，可以将多址接入技术归纳为两大类：固定分配接入方法和动态分配接入方法。

为了能够更一般地理解多址接入方法，在此首先介绍基本的通信资源分配方式，然后讨论通信业务要求对分配方式的影响，以及实现接入控制的基本分配调度算法。

1.4.1 基本的资源分配方式

在很多情况下通信资源具体体现为物理信道。此时，通信资源的分配有两种基本的方式和思路：

第一种是在物理信道上预先固定地划分出一系列逻辑信道，得到一组逻辑信道形成的空间。多个节点（或用户终端）通过选择占用其中一部分逻辑信道，并且没有逻辑信道同时被重复占用，这样可以实现同一物理信道上资源的分配和共享，这种方式称为固定（资源）分配方式。

第二种是在物理信道上根据需要动态地划分逻辑信道，多个节点（或用户终端）即时地选择占用其中一部分逻辑信道，实现同一物理信道上资源的分配和共享，这种方式称为动态（资源）分配方式。由分配方式导出的实现算法即为分配调度算法，主要负责监视整个逻辑信

道空间，并为每个用户选择和分配相应的逻辑信道。

1. 逻辑信道划分

为了在物理信道上划分出有限个、且没有重叠的逻辑信道空间，理想的划分方式应该使各逻辑信道上传输的信号满足相互正交的要求，这样才能使不同的逻辑信道之间相互隔离、避免串扰。因此，逻辑信道的分配过程实际上也正是不同的用户信号之间进行正交化处理的过程。通过使彼此间的相互干扰为零或接近于零，可以实现多个用户信号独享各自的逻辑信道，并实现共享公共物理信道的目的。

设用户 i 的信号波形为 $x_i(t)$，$i=1$，2，…。若在时域中满足如下关系，则各用户信号之间是正交的：

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_i(t)x_j(t)\mathrm{d}t=\begin{cases}K_1 & i=j\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1.1}$$

其中，K_1 是一个非零常量。类似地，如果信号在频域中有如下关系，则它们也是正交的：

$$\int_{-\infty}^{\infty} X_i(f)X_j(f)\mathrm{d}f=\begin{cases}K_2 & i=j\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1.2}$$

其中，K_2 是一个非零常量。函数 $X_i(f)$是信号 $x_i(t)$的傅里叶变换。同样类似的，如果在伪随机码集中有如下关系，则它们也是正交的：

$$\int_{-\infty}^{\infty} c_i(t)c_j(t)\mathrm{d}t=\begin{cases}K_3 & i=j\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1.3}$$

其中，K_3 是一个非零常量。$c_i(t)$ 是信号 $x_i(t)$ 的伪随机码波形。

用式（1.1）所示的正交化过程表征的逻辑信道划分方式称为时分多址（TDMA）方式。同样，由式（1.2）所示的正交化过程表征的划分方式称为频分多址（FDMA）方式。而由式（1.3）所示的正交化过程表征的划分方式称为码分多址（CDMA）方式。这是最为基本的 3 种多址接入方式。

应当指出，上述 3 式表征的均是理想正交化时的分配方式，在实际的应用中，一般难以找到如此理想的实现方式。正交化的不理想将导致划分的逻辑信道之间不完全独立，从而引发用户信号之间的相互干扰，这种干扰的存在可能会降低通信系统的传输质量，比如引起误码率上升，或出现“远近影响”等情况。

所谓“远近影响”是指，在接收机收到的众多的用户信号中，具有较高接收功率的用户信号对较低接收功率用户信号形成抑制或干扰所造成的影响。通常情况下，接收功率高意味着用户间通信距离较近，功率低则表明通信距离较远，所以称为“远近影响”。产生“远近影响”的根本原因是逻辑信道的划分不理想，存在信号之间的相互干扰。减小或消除“远近影响”的技术措施可分为主动式和被动式两类。主动式措施强调增加逻辑信道之间的隔离性，提高用户信号之间的正交化程度。比如，通过加强频率规划与分配、采用自适应均衡技术、设计正交化程度更高的码集等措施，尽量从根本上减小逻辑信道之间的相互干扰。被动式措施往往是对相互干扰所带来的影响采取一些补救措施，比如功率控制等。

式（1.1）～（1.3）只给出了逻辑信道划分的数学机理，并未限定其物理实现方式。那么什么样的具体实现方法能够满足式（1.1）～（1.3）呢？实践中，三种基本的多址接入方法

有着各自的实现方式和解决办法。

对于 TDMA 方式，逻辑信道划分是在时域中实现用户信号正交化的过程。假定通信资源是一个给定的时间段，一种简单的物理实现方法是将该时间段划分为一系列不重叠的时间片作为逻辑信道，如图 1.3（a）所示。由于时间片没有重叠，此时在理论上显然满足式（1.1），因此这样的逻辑信道划分是一种符合要求的正交化过程。这样，不同的用户信号可以使用不同的时间片，通过定时的采样门即可将不同的用户信号区分开来。在实际的 TDMA 方式应用中，通常在邻接的逻辑信道（时间片）之间还需要增设保护时间（或称保护间隔），用来提高逻辑信道之间的隔离性，以减小信号之间的相互干扰。

对于 FDMA 方式，逻辑信道划分可以看成是在频域实现用户信号正交化的过程。如果通信资源是一个给定频带宽度的频段，一种简单而自然的实现方法是将频率带宽划分为一系列不重叠的子频带形成逻辑信道，让不同的用户信号使用不同的子频带，在接收端采用子频带滤波器将不同的用户信号区分开来，如图 1.3（b）所示。由于不同的子频带在频率轴上不重叠，显然满足式（1.2），是一种符合要求的正交化过程。在实际的 FDMA 方式应用中，通常在邻接的逻辑信道（子频带）之间还需要增设保护频带（或称隔离频带），因为滤波器性能难以做得非常理想，设置保护频带可以有效提高逻辑信道间的隔离性，减小用户信号之间的相互干扰。

对于 CDMA 方式，逻辑信道划分是通过用户信号的正交化映射实现的。将不同的用户信号映射成为正交码集中不同的码序列，使其满足式（1.3），这样在时间和频率上是完全共享的，不同的逻辑信道由不同的码序列决定，如图 1.3（c）所示。选择正交码集是 CDMA 方式物理实现的关键，通常使用的码集既有满足正交性能的码集（如 Walsh 码），也有相关性能好（相关性小）的伪随机序列码集（如 m 序列），这里的不相关性可视为另一种形式的正交性，当不同用户信号之间完全不相关时，可以在接收机中方便地区分出不同的用户信号。

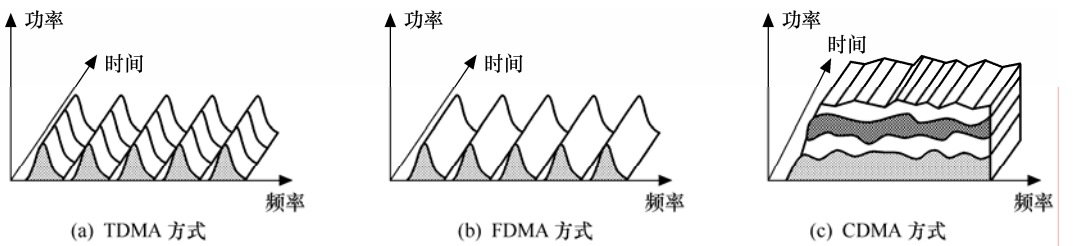


图 1.3　基本 TDMA、FDMA 和 CDMA 方式资源共享示意图

逻辑信道之间的隔离性只由码序列之间的自相关性或互相关性决定，并不能通过设置“码保护间隔”来改善性能。应当注意的是，CDMA 方式没有在时间或频率上分配通信资源，这是否意味着通信资源的使用不受限制呢？事实并非如此。实际中无论采用什么样的码集，总存在着逻辑信道之间的相互干扰（也称多址干扰），要么源于正交性能的不理想，要么源于传输信道的畸变导致的干扰。用户接入系统的过程正是通信资源的分配过程，由于多址干扰随着用户接入数目的增加而线性增加，当干扰功率达到解调用户信号所需的最低信噪比门限时，允许的用户接入数目达到最大（更多用户的接入将导致信号无法正常解调），可以认为此时通信资源刚好分配完毕。因此，CDMA 方式中通信资源由带宽或时间转化成了信号功率，

通信资源的分配实际上变成了功率的分配，自然受到了可用资源的限制。这样，CDMA 方式可带来两方面的好处：一是系统对技术的改进、提升或新技术引入有很好的自适应性，因为任何降低干扰的措施都可以直接转化为性能的改善或系统容量的提高；二是系统对通信资源的占用依赖于业务本身的传输特性，如果信息传输出现了短暂的停止，占用资源也会相应地被短暂地释放。这种动态资源占用特点避免了资源浪费的情况，可以实现最大的资源使用效率，便于支持各类业务的传输，尤其适合于综合业务的支持。

根据逻辑信道划分的思想，实际中使用的资源划分方式还可能有其他种类，比如空分多址（SDMA）方式、波分多址（WDMA）方式、极化区分多址（PDMA）方式等。在卫星通信中，如果每个转发器连接到不同的点波束区域，这就允许在地理区域上分开的多个地面站使用同一频率访问整个卫星，这样，具有不同点波束覆盖的地面站可以通过空分多址实现接入。类似地，还可以采用不同的波长或者不同的极化方式来寻址不同的用户，这就是所谓的波分多址方式和极化区分多址方式。考虑到现代数字通信系统中应用最多、最具代表性的方式是时分多址（TDMA）和码分多址（CDMA），本书讨论的重点主要是围绕着这两种方式展开的。

2. 固定分配方式与动态分配方式

逻辑信道划分方法为通信资源的共享提供了依据，如何使用这些方法实现用户的多址接入呢？根据通信业务特点的要求，多址接入方式可以选用固定的或者动态的分配方式。在前面描述的三种基本逻辑信道划分中，如果划分结果在一次通信过程中保持不变，即逻辑信道的分配不随信息流传输时间或状态的变化而改变，则称为固定分配接入方式。如果划分结果在一次通信过程中可能发生变化，即逻辑信道的分配会依据信息流的即时传输要求而变化，则称为动态分配接入方式。无论固定分配方式还是动态分配方式，都应当尽量满足各个逻辑信道上信号传输的正交性要求，使逻辑信道之间实现相互隔离、避免串扰。与固定分配方式不同，动态分配方式中的资源分配总是根据即时的信息流传输状态而动态变化的。所以，一般来说，动态分配方式具有更高的资源利用效率，同时其实现可能要更复杂一些。

在固定分配 TDMA 方式中，总是以一个有限的、确定长度的时间段作为可用通信资源进行逻辑信道划分的。该时间段通常被划分为一系列数目有限且不重叠的时间片（即逻辑信道），通过让不同用户信号占用不同的时间片即可实现固定方式的 TDMA。固定分配方式一般要求在使用的众多时间段中，每个时间段里的时间片分配结果都是一致的、相同的，并且保持不变。这种固定分配 TDMA 方式也常称为同步时间复用 TDMA 方式。事实上，这一要求使固定 TDMA 方式的实现更为简单。在一般的应用中，未加专门说明的 TDMA 方式都是指固定分配 TDMA 方式，其中的时间段一般称为帧，时间片则称为时隙。

在动态分配 TDMA 方式中，时间段上逻辑信道的划分是即时的、动态的、非固定的，即用户信号对时间的占用是动态变化的。具体的实现方法主要分为两类：一类是基于统计算法的随机接入方法，这类方法使逻辑信道的划分和分配都呈现出与实际需求基本一致的动态性和即时性，而且实现简单。但基于统计算法的逻辑信道划分由于存在着不确定性，有可能出现重叠，因而可能导致信号之间的接入冲突。另外一类是基于预约的接入方法，通过预约，可以临时划分逻辑信道，减少或者避免信道划分过程中的重叠，此时更多地使用了异步统计复用 TDMA 方式，即每帧中分配给不同用户的时隙数可能因其需要而不同，不同的帧中的分