

# 蜂窝移动 通信系统的空口演进

——LTE、LTE-A、LTE Pro和5G

许宁◎编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

# 蜂窝移动通信系统的空口演进

——LTE、LTE-A、LTE Pro 和 5G

许 宁 编 著



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com

## 内 容 简 介

本书主要对移动通信系统的空口技术进行介绍,包括 LTE、LTE-A、LTE-A Pro 空口技术的原理和工作方式,以及 5G 新空口的最新进展。全书共 6 章,第 1 章围绕移动互联网的发展对移动通信系统进行概述,第 2 章介绍空口协议栈的高层部分,第 3 章和第 4 章对空口链路中最重要的物理层进行介绍,第 5 章介绍空口接入和无线连接管理等控制面的内容,第 6 章针对移动通信系统面向多样化演进的 MTC、NB-IoT、D2D 和 5G NR 进行介绍。

本书适合从事移动通信行业的工程技术人员作为参考资料使用,也可以供通信工程专业的高校学生阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

蜂窝移动通信系统的空口演进: LTE、LTE-A、LTE Pro 和 5G / 许宁编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017.10

ISBN 978-7-5635-5173-6

I. ①蜂… II. ①许… III. ①蜂窝式移动通信网 IV. ①TN929.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 192081 号

---

书 名: 蜂窝移动通信系统的空口演进——LTE、LTE-A、LTE Pro 和 5G

著作责任者: 许 宁 编著

责任编辑: 刘 佳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 26.5

字 数: 691 千字

印 数: 1—1 000 册

版 次: 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-5173-6

定 价: 68.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

# 前 言

蜂窝移动通信网络是信息基础设施的重要组成部分,在当今信息社会中起着十分重要的作用。传统的蜂窝移动通信系统以语音业务为主,方便人们随时随地进行实时沟通。随着互联网的迅速发展,移动通信网络迅速成为接入互联网的主要工具。语音不再是主要的业务模式,以 TCP/IP 为基础的互联网应用占据了主流。蜂窝移动通信网络与互联网结合,催生了移动互联网。移动互联网对个人生活、娱乐、商业、公共服务等诸多方面产生了巨大影响。这一演进深刻影响了移动通信系统的网络架构和工作方式,使其与传统系统既有继承关系,又有很大改进。从整个移动互联网来看,移动通信网络扮演接入网的角色。而由于历史原因和商业因素,移动通信系统本身又是一个自成一体的通信系统。因此,移动通信系统涉及的内容非常繁杂。

为了帮助读者理解这一复杂系统,本书以空口接入技术为主,从数据传递、网络接入、连接和移动性管理等方面介绍移动通信系统。在内容选择方面,由于蜂窝移动通信系统现已演进到第 4 代,第 5 代系统也正在研发当中,因此本书聚焦于当前正在大规模建设和运营的 4G 移动通信系统,即通常所说的 LTE/LTE-A 系统。在 LTE/LTE-A 的基础上,本书还纳入了最新的 LTE-A Pro 相关技术,并结合移动互联网的新发展介绍即将出现的 5G 系统关键技术。对于已经或即将退出历史舞台的技术则不做重点讨论。在内容组织方面,作者希望将通俗性和严谨性相结合,从系统概貌逐步深入到关键技术,帮助读者建立全局的概念并了解其中的细节。全局概念只是回答了移动通信系统“是什么”的问题,只有深入细节,才能回答移动通信系统“为什么”这样设计和“怎么样”达到其设计目标的问题。通过阐述现有系统的优势和欠缺,希望能引发读者思考如何优化现有系统,以及如何设计未来系统。为了达到这一目的,本书以“先概述后深入”为章节内容编排的原则,将全书组织如下。

第 1 章以简要介绍通信系统发展历史脉络入手,不仅帮助读者回顾通信系统的基本概念,而且从中归纳通信技术发展的大趋势,即 IP 化和承载/控制分离。本书以蜂窝移动互联网用户在移动通信网络的日常用例,给出移动通信系统需要提供的服务,并讨论其面临的问题,这些问题是移动通信系统设计的出发点。通过第 1 章对 4G 移动通信系统的整体介绍,希望为读者建立起初步理解和思考的基础。由于蜂窝移动通信系统是在移动互联网的大背景下工作的,本书以互联网的 TCP/IP 通信模型为基础,介绍移动通信网络在其中作为链路层的作用,重点

讨论这一“链路层”的特殊之处,包括它的协议栈、传输网以及特有的 Relay 和家庭基站等接入方式。移动通信系统在传递数据方面区别于通用 IP 网络之处包括其 QoS 机制、安全保障、特色服务等方面。

第 2 章是对空口协议栈的整体介绍,包括协议栈组成、各子层关系、无线承载和信道等概念,重点介绍 PDCP、RLC 和 MAC 层的工作方式。对于每一个子层,内容安排为:先概述,即介绍该层的基本概念、主要功能、发端和收端对上层数据包的处理;再详解,即深入介绍该层的主要功能;最后总结协议数据格式,即完整介绍该层的协议数据格式。

空口的物理层作为最复杂的部分,分为两章介绍。第 3 章主要给出物理层设计的基本原理和关键技术,包括 LTE、LTE-A 以及 LTE-Pro 使用的 OFDM、MIMO、灵活双工、HARQ、AMC、功率控制、ICIC、CoMP、载波聚合、LAA、LWA 等。第 4 章则给出系统实现这些原理和技术的运行细节。对于各个技术细节,作者尽量围绕第 1 章提出的几个问题来解释其设计原因,即按“为什么”和“怎么做”来进行阐述。第 4 章对上行和下行物理共享信道、控制信道、参考信号以及资源分配进行详细介绍。

第 5 章则聚焦于空口链路的控制面,介绍空口接入和空口链路管理。这里不仅包括了 RRC 层信令内容,也包括了前面章节未介绍的物理层和 MAC 层关于空口接入的内容。空口链路管理包括连接态和空闲态两类,本书重点介绍切换和寻呼这两个与空口密切相关的过程。有了对空口协议栈全面的了解,理解本章最后的 Relay 的 Un 空口特点就较为容易了。

蜂窝移动通信系统是一个持续发展和演进的系统,它不断吸纳新技术、满足互联网和信息社会的新需求。除了第 1 章中讨论的问题,移动通信系统还面临着业务多样化的挑战。在理解了移动通信系统提供的通用数据传递和移动性管理服务后,读者可在第 6 章了解移动通信系统应对特定业务所支持的新技术,包括 D2D、MTC、NB-IOT 等。移动通信系统的下一代,即 5G 系统,正是朝着多样化发展,并解决因多样化所带来的新问题。由于在本书写作期间 5G 系统尚未定型,因此本书在第 5 章只讨论 5G 系统的整体目标和关键技术。

一本书并不能涵盖蜂窝移动通信系统的所有方面,由于篇幅所限,本书重点涵盖了移动通信系统最重要也是最有特点的空口链路工作方式。此外作者根据自身理解的重点对内容进行了取舍,例如一些内容尽管在标准化过程中讨论较多,但由于各种原因并没有规模化应用,则没有纳入书中,或是仅做简单介绍。在内容的安排上,也没有把一些技术或新特性单独介绍,而是根据它们在系统中的作用,把它们安排在合适的章节中。如果读者希望获得更深入的细节,可以按文中给出的标准文档索引参阅相关标准。尽管标准文档更加权威,但它们是为实现系统的人写的,而不是为学习这一系统的人而写,因此并不容易阅读。基站与终端之间的空口标准具有“非对称”的特点,即对终端的行为进行了详细的标准化,

而作为控制者的网络侧,则只需知道终端对某个信令会做何种操作。通过标准化的终端行为,基站可以根据某个目的以及预测终端行为所带来的结果,来控制终端进行这样或那样的操作。至于在什么情况下下发哪个信令以达到某个目的,则留给基站自由实现。因此单从标准文档中较难知道网络如何工作以及为什么这样工作。本书希望不仅做知识的搬运工,还试图解释通信标准背后的逻辑,让读者能用较短的时间尽快理解通信系统中相对重要的内容,并能帮助读者更容易阅读标准文档。通信技术中有大量的专有名词和缩写,在用中文表达时可能存在多种译法。为了辅助读者将本书内容与标准协议和英文文献对应起来,本书对于专有名词和缩写一般都附以英文全拼。此外,书中的章节索引希望能帮助读者方便翻阅到感兴趣的内容。在写作过程中,作者通过对照协议标准和请教专家等方式尽量避免出现错误,但总会存在疏漏的地方,希望读者不吝指出,在此提前感谢。

最后,感谢中国移动通信研究院的众多同事在本书写作过程中提供的帮助,特别是张龙、旷婧华、韩晶、毛剑慧、邓伟等同事对多处技术细节的指正。

作 者

# 目 录

<b>第 1 章 蜂窝移动通信系统概貌</b> .....	1
1.1 极简发展史 .....	1
1.1.1 通信技术的发展 .....	1
1.1.2 移动通信系统的发展 .....	9
1.1.3 移动互联网的发展 .....	13
1.2 要解决的主要问题 .....	15
1.2.1 概述 .....	15
1.2.2 无线信道高速数据传输 .....	17
1.2.3 无线链路高效组网 .....	20
1.2.4 时延 .....	24
1.2.5 移动性 .....	25
1.2.6 性价比 .....	27
1.3 系统的组成 .....	28
1.3.1 网元 .....	28
1.3.2 网络架构 .....	31
1.3.3 接口和协议栈 .....	32
1.3.4 传输网 .....	34
1.3.5 系统特点 .....	40
1.4 提供的服务 .....	43
1.4.1 PDN 连接 .....	43
1.4.2 QoS 保障 .....	45
1.4.3 安全保障 .....	47
1.4.4 语音业务 .....	52
1.4.5 广播和组播业务 .....	54
<b>第 2 章 空口数据传递</b> .....	58
2.1 空口概述 .....	58
2.1.1 空口链路层协议栈 .....	59
2.1.2 无线承载和信道 .....	61
2.1.3 TCP 对空口设计的影响 .....	65
2.2 PDCP 层 .....	66
2.2.1 概述 .....	66

2.2.2	按序传递	67
2.2.3	头压缩	70
2.2.4	空口加密和完整性保护	71
2.2.5	丢弃超时包	73
2.2.6	PDCP 协议数据格式	74
2.3	RLC 层	75
2.3.1	概述	75
2.3.2	分段和级联	77
2.3.3	重组、排序和重传	78
2.3.4	RLC 协议数据格式	84
2.4	MAC 层	86
2.4.1	概述	86
2.4.2	调度	89
2.4.3	HARQ	93
2.4.4	BSR	95
2.4.5	逻辑信道优先级处理	97
2.4.6	MAC 协议数据格式	98
<b>第 3 章</b>	<b>空口物理层基础</b>	<b>100</b>
3.1	空口物理层的特点	101
3.1.1	基本的无线通信链路	101
3.1.2	LTE 物理层关键特性	105
3.2	OFDM 和 SC-FDMA	107
3.2.1	多载波传输	107
3.2.2	OFDM	108
3.2.3	SC-FDMA	116
3.3	空口时频资源	117
3.3.1	概述	117
3.3.2	时域资源划分	118
3.3.3	频域资源划分	118
3.3.4	带宽配置	119
3.3.5	工作频段和频点	120
3.4	双工方式	123
3.4.1	FDD 和 TDD	123
3.4.2	TDD 的帧结构	125
3.4.3	上行同步和上行定时提前	127
3.4.4	TDD 保护间隔	128
3.4.5	FDD 半双工	130
3.5	链路自适应	130
3.5.1	自适应调制编码	130



3.5.2	CQI 反馈 .....	131
3.5.3	HARQ .....	134
3.5.4	功率控制 .....	140
3.6	多天线技术 .....	143
3.6.1	概述 .....	143
3.6.2	空间发送分集 .....	144
3.6.3	空分复用 .....	148
3.6.4	波束赋形 .....	154
3.6.5	多天线接收 .....	155
3.6.6	信道空间信息获取 .....	159
3.6.7	天线形态和空间相关性 .....	161
3.6.8	Massive MIMO .....	163
3.7	小区间同频干扰抑制 .....	166
3.7.1	概述 .....	166
3.7.2	ICIC .....	167
3.7.3	HetNet 和 CRE .....	169
3.7.4	eICIC 和 FeICIC .....	170
3.7.5	CoMP .....	172
3.8	载波聚合 .....	176
3.8.1	CA 概述 .....	176
3.8.2	CA 分类和应用场景 .....	178
3.8.3	CA 的配置和激活 .....	181
3.8.4	双连接 .....	182
3.8.5	LAA .....	185
3.8.6	LWA 和 LWIP .....	187
3.9	终端等级和能力 .....	189
<b>第 4 章</b>	<b>深入空口物理层</b> .....	<b>192</b>
4.1	下行物理层 .....	193
4.1.1	概述 .....	193
4.1.2	下行数据信道 PDSCH .....	195
4.1.3	下行参考信号 .....	200
4.1.4	下行 MIMO 传输 .....	211
4.1.5	下行控制信道 .....	229
4.1.6	下行调度和资源分配 .....	244
4.1.7	下行功率分配 .....	253
4.1.8	MBSFN 子帧和组播信道发送 .....	255
4.2	上行物理层 .....	256
4.2.1	概述 .....	256
4.2.2	上行数据信道 PUSCH .....	258

4.2.3	上行参考信号	259
4.2.4	上行控制信道	269
4.2.5	PUSCH 发送上行控制信息	285
4.2.6	上行 MIMO 传输	288
4.2.7	上行调度和资源分配	292
4.2.8	上行功率控制	297
<b>第 5 章</b>	<b>空口接入和无线连接管理</b>	<b>306</b>
5.1	接入网络和移动性管理	307
5.1.1	网络附着和连接建立	307
5.1.2	终端状态转换	308
5.1.3	空口接入	309
5.1.4	移动性管理	311
5.2	系统信息广播	313
5.2.1	概述	313
5.2.2	MIB 和 PBCH	314
5.2.3	SIB	316
5.2.4	系统信息更新	318
5.3	同步信号和 PCI 获取	319
5.3.1	物理层同步信号	319
5.3.2	获取同步和 PCI	321
5.4	小区选择和重选	322
5.4.1	小区选择	322
5.4.2	接入限制	324
5.4.3	小区重选	325
5.5	随机接入	329
5.5.1	概述	329
5.5.2	四步过程	330
5.5.3	PRACH	336
5.5.4	无竞争随机接入	340
5.6	无线连接管理	341
5.6.1	RRC 连接控制	341
5.6.2	连接态 DRX	349
5.6.3	小区快速开关和发现信号	351
5.7	切换	352
5.7.1	概述	352
5.7.2	连接态测量和上报	353
5.7.3	基于 X2 接口的切换过程	358
5.7.4	基于 S1 接口的切换过程	361
5.7.5	无损切换	363

5.7.6	切换中的密钥管理 .....	364
5.7.7	切换失败恢复 .....	366
5.8	寻呼 .....	366
5.8.1	空闲态移动性管理 .....	366
5.8.3	寻呼时机 .....	370
5.9	Un 接口 .....	372
5.9.1	Relay 概述 .....	372
5.9.2	Un 接口的数据发送 .....	374
5.9.3	Un 接口的物理层控制信道 .....	375
5.9.4	Un 接口的 HARQ .....	376
5.9.5	Un 接口建立 .....	377
<b>第 6 章</b>	<b>移动通信系统的多样化演进</b> .....	<b>378</b>
6.1	移动通信系统的演进需求 .....	379
6.1.1	概述 .....	379
6.1.2	持续增长的移动宽带需求 .....	379
6.1.3	新的数据传递模式 .....	380
6.1.4	系统演进的性能目标 .....	381
6.2	MTC .....	382
6.2.1	概述 .....	382
6.2.2	MTC 终端能力等级 .....	383
6.2.3	MTC 覆盖增强 .....	384
6.2.4	MTC 节电方式 .....	388
6.2.5	MTC 过载控制 .....	390
6.3	NB-IoT .....	390
6.3.1	概述 .....	390
6.3.2	NB-IoT 的数据传递 .....	391
6.3.3	NB-IoT 的空口接入 .....	396
6.4	D2D .....	398
6.4.1	概述 .....	398
6.4.2	D2D 通信 .....	400
6.4.3	D2D 发现 .....	402
6.4.4	D2D 同步 .....	402
6.5	5G .....	403
6.5.1	概述 .....	403
6.5.2	系统架构 .....	404
6.5.3	新空口 .....	406
附录	ZC 序列特性 .....	411

# 第 1 章 蜂窝移动通信系统概貌

## 【本章内容导读】

蜂窝移动通信系统是一个复杂的系统。本书试图带你由浅入深逐步了解它的无线传输,也就是空口部分,理解它的原理和实现(如何工作和为什么这样设计)。而本章作为全书第 1 章,先介绍移动通信系统的主要作用和整体情况,为后面的深入探讨奠定基础。

作为快速了解一事物的一种常用方法,在 1.1 节非常简短地回顾通信技术的发展历史,目的是概要介绍通信系统中的基本概念,包括点对点通信和通信网络、模拟通信和数字通信、电路交换和分组交换、通信协议分层和标准化等。目前规模应用的移动通信系统是第 4 代系统,它和罗马一样,并不是一天建成的,回顾移动通信系统的发展历史有助于理解它为什么会成为现在这个样子。

1.2 节基于移动通信系统在移动互联网中的主要作用,指出移动通信系统需要解决的主要问题。作为了解事物的另一种有效方法,提问有助于抓住事物的关键,而回答问题则会带人们逐步深入了解它的细节。只有深入细节,才能理解移动通信系统“为什么”需要这样设计,以及“怎么样”工作才能达到其设计目标。

移动通信系统是一个复杂的系统。由于书籍的篇幅限制,未能详细介绍移动通信系统各方面的详细内容,本书重点介绍空口的内容。为了让读者理解空口与其他部分的关系,1.3 节对整个 4G 系统进行概述,1.4 节介绍 4G 系统提供的服务。移动通信系统的核心作用是传递用户生产和消费的信息。在移动互联网中,所有信息都使用 TCP/IP 协议族封装在 IP 数据包中,通过各种底层通信系统传递。4G 移动通信系统正是为数据传递,特别是基于 TCP/IP 的数据传递进行设计和优化的。除了为绝大多数移动互联网应用提供 QoS 保障和安全保障等共性服务外,4G 移动通信系统还为多种有专门需求的应用提供数据传递服务,例如语音、广播、公共安全等。对于各种新需求,4G 系统的作用还在不断演进。

## 1.1 极简发展史

### 1.1.1 通信技术的发展

简单地说,通信是指把信息从一处(发送端)传递到另一处(接收端)的过程。通信的两端可以是人,也可以是物。“信息”则是一个具有丰富内涵的词(“通信”也是),它可以是存在于声音、图像、符号、文本中的,任何发送者认为有意义而接收者不知道的事情。

为实现远距离的通信,需要某种信号(即某种随时间或空间变化的物理量)来表示信息,并用某种通信技术来传递信号。广义上通信技术的历史和人类社会历史一样久远,例如中国古

代的烽火台和驿站,从一定程度上可比拟今天使用的基站和路由器。而今天所说的通信技术一般是指用电信号或光信号通过线缆进行信息传递的有线通信,以及通过电磁波在开放的空间进行信息传递的无线通信。现代通信技术从早期理论和实验室雏形发展成为如今信息社会的基础技术之一,大约经历了近两个世纪。在此期间,通信理论的丰富、工程技术的进步和市场需求的旺盛共同促进了通信技术的不断创新和更新换代,而今这一技术领域还在继续发展之中。

### 1. 有线通信和无线通信

有线通信起源于 19 世纪的电报和电话系统,最初使用有线电缆作为电信号的传输介质。19 世纪 30 年代莫尔斯发明了电报,70 年代贝尔等人发明了电话。电报和电话系统从 19 世纪后半叶开始飞速发展,通信的地理范围越来越大。19 世纪 60 年代建设的跨洋电报电缆极大地便利了欧洲和美洲之间的生活和商业等方面的信息传递,而 20 世纪中期的跨洋电话电缆则为之后的互联网大发展奠定了基础。20 世纪 70 年代起,传递光信号的光纤技术开始应用和发展,进一步提高了信息传输的速率和距离,随后逐步取代铜缆的地位,成为有线通信的主要传输介质。

无线通信是从 19 世纪电磁波理论建立以来的、基于电磁信号和理论的通信技术。19 世纪 70 年代麦克斯韦在电与磁之间建立了明确的数学关系,并从理论上预测了电磁波的存在,80 年代赫兹使用振荡器证明了麦克斯韦的预测,90 年代马可尼则用电磁波实现了无线电报的跨洋传送,从而开启了无线通信的实用时代。无线通信不受铺设线缆的束缚,更为灵活。最早的广播电视系统也是使用无线技术进行图像传输的。20 世纪中叶无线通信被应用在卫星通信当中,而无线通信最广泛的应用是在开始于 20 世纪后期的移动通信系统中(见 1.1.2 节)。

### 2. 点对点通信和通信网络

一般将发送信息的一端称为信源或发送端,而接收信息的一端称为信宿或接收端。信源到信宿的通信称为点对点通信,常将这两者及其之间的信息传输通道称为一条通信链路,可以用图 1.1 的链路模型来概括。模型中间的信道部分对于有线通信是电缆或光缆,对于无线通信则是电磁波的空间传播路径。发送端要将原始信息转换成适合在信道上传输的信号。信号在信道中传输时,会发生能量上的衰减,并受到噪声和干扰的影响。

注意图 1.1 中的模型仅给出了单向的信息传递,发送端和接收端的角色是固定的,信道也是单向的,可称该系统或信道是单工(Simplex)模式。而大多数的点对点通信是对称的,即一端既是发送端,也是接收端,它与对端双向交互信息,称为双工(Duplex)模式。点对点通信的一种变化形式是广播通信(Multicast),即信息的发送端只有一个,而接收端有多个。广播往往是单向的,相应的称点对点通信为单播(Unicast)

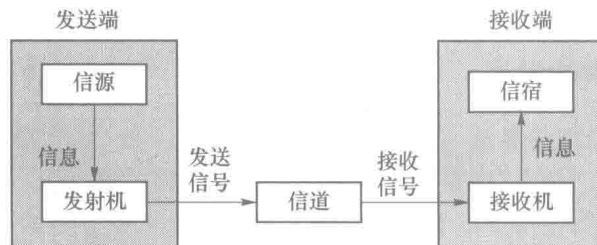


图 1.1 点对点通信模型

通信距离增大、用户增多后,在任意通信双方间用线缆或无线信道架设点对点通信链路的方式显然效率低下。连接大量通信端点的并为它们之间自动建立通信链路的交换机在19世纪80年代开始应用,形成了通信网络。在通信网络中,通信双方之间的信息交互可以称为一个会话(尽管信息不仅局限于话音,这个从电话网络产生的历史名词现今仍在沿用),会话使用由多段点对点通信链路所组成的一条“逻辑”通信连接来传递信息。此时如果想强调发送端和接收端之间的通信是由多个点到点的通信链路组成,则称其为端到端通信。

多个通信连接(或会话)可使用同一条点对点物理链路,使得它们可服务的会话数量(即容量)增加。而通信连接又可以通过增加物理链路的数量来延伸到更远更广的地方。因此,使用交换机的通信网络极大扩张了通信系统的容量和范围。

当一个点对点通信链路承载多个通信连接时,就需要某种共享信道的复用(Multiplexing)技术。最早使用的是时分复用(Time Division Multiplexing, TDM),即将时间分为等长的时隙,不同连接使用不同的时隙;以及频分复用(Frequency Division Multiplexing, FDM),即不同连接使用光/电信号的不同频率范围携带信息。对于信息传输速率给定的会话,如话音通信,点对点技术所能提供的信息传输速率越高,能复用在一起的连接数或会话数就越多(或说容量越大)。另外,交换机要有效地利用所有点对点链路,组织起满足任意两端间通信需求的连接。因此,可将一直以来通信技术发展所追求的两大方向概括如下:

- (1) 提高点对点通信链路的信息传输速率;
- (2) 构建高效率的通信网络。

通信网络技术有着丰富的内容和类型。可根据其服务范围从小到大,将通信网络分为局域网、接入网、城域网、广域网等;也常以网络使用的点对点通信技术来称呼一个网络,例如有线网络和无线网络;还会根据网络所承载的信息类型而称其为电话网、广播电视网、数据网等。在互联网之前,用户和设备规模最大的通信网络是各个国家和地区的公共交换电话网络(Public Switched Telephone Network, PSTN),提供拨号语音服务。

不同网络采用了适合各自特点的不同技术,但在发展方向上却有着共同的趋势:点对点通信技术从模拟方式进化为数字方式,而通信网络交换机的工作方式也从电路交换演进为分组交换。

### 3. 模拟通信和数字通信

在通信技术发展初期,表示和传递信息所使用的电信号或电磁波信号往往是对信息本身的直接模拟,例如语音(电话)、静态图像(传真)、动态图像(电视、可视电话)等信息的传递。这些信号有两个特点,一是信号随时间连续变化,二是变化的幅度是连续的,称之为模拟信号(Analog Signal)。用模拟信号表示的信息源也可称为模拟信源。

早期通信系统多数是针对某种单一的模拟信号传输进行设计和优化,系统的输入和输出均为模拟信号,称之为模拟通信系统,例如模拟电话系统、传真系统、模拟广播电视系统等。但莫尔斯的电报系统则是一个特例,它传递的是离散信号,即在时间上非连续的信号。

从20世纪40年代开始,随着计算机技术的发展,开始需要在计算机之间进行信息传递。计算机中存储的是用数(常用二进制的0和1)表示的数码(Digit)。它们要么是从模拟信源经过数字化(包括采样和量化编码,又称为模-数转化)来生成的,要么是由离散信源(例如文本信息)通过编码直接生成,统称为数据(Data)。为传递数据而设计的通信系统被称为数字通信系统(Digital Communication)或数据通信系统。与此同时,香农用统计学为数字通信构建了理论基础——信息论。遵循该理论可将数字通信系统的模型分为如图1.2所示的三个部分:信

源编码和解码、信道编码和解码、调制和解调。

信息的生产者(信源)生成原始信息或原始信号后,通过发送端的信源编码转换为信息数据(或称信源码字)。这一部分通常包含采样、量化、压缩编码等过程,以去除原始信号中的冗余成分,从而更“有效”地利用信道。信道编码部分则在信息数据中加入可控的冗余成分,生成信道码字,以对抗信道中的噪声和干扰对信号的破坏,使它们可被接收端“可靠”地接收。调制部分将各个信道码字用某种模拟信号的变化来表示,形成适合在信道上传输的通信信号,最终发送到信道中。在接收端,通过对应的解调、信道解码和信源解码部分,恢复出原始信息,交付给信息的使用者(信宿)。

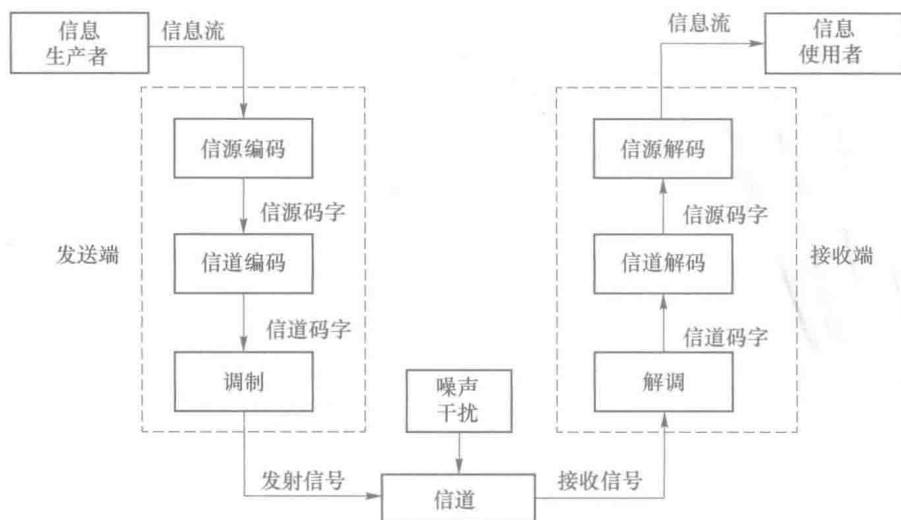


图 1.2 数字通信模型

上面提到的有效性和可靠性是数字通信系统的两个主要性能指标。有效性指在给定信道条件下,系统应传递尽可能多的信息,这意味着要对原始信息进行压缩再通过信道传输;可靠性指接收端收到的信息要与发送端发出的尽可能保持一致,这又意味着要给信道中传输的信息量增添一定冗余。两者是否存在矛盾呢?香农用“熵”来度量信息量,并用一系列定理回答了这一疑虑。

香农的信源编码定理表明:只要编码后的信息量“不低于”原始信息含义中的信息量,接收端就可以无损地恢复出原始信息。信道编码定理则表明:对于任意给定的受噪声影响的信道,只要传输信息的速率“不高于”信道容量,就可保证传输差错率达到任意小。也就是说,点对点通信的性能取决于信道本身,而上限可以用信道容量,即理论上该信道的最大信息传输速率来定量地给出。而信源—信道分离定理则指出,只要信源编码和信道编码符合上述两个定理,则压缩信息后再增加冗余的两步处理方式,可以获得与其他任何最优传输方式一样好的性能。这就意味着,信源编码不需要考虑信道的特性,而信道编码也无须知道原始信息的特性,两者完全可以独立发展。

在信息论建立之后,信道编码技术的发展致力于达到信道容量,实际上现今已经非常接近了。而各种信息源或模拟信号经过数字化后,都可以进行数字通信,因此数字通信的应用范围更加广阔。此外,数字通信比模拟通信更容易进行加密保护。通信由模拟方式向数字方式的转型从 20 世纪 70 年代开始。到了 90 年代,PSTN 系统也开始大量使用数字通信技术,从此通信系统以数字通信技术为主导。但模拟电视广播一直到 21 世纪才开始被数字技术大规模

替代,数字通信和计算机技术的发展共同推动了信息时代的到来。

注意数字通信系统并不能离开模拟通信:在信道中传输的通信信号是模拟的。在理论和工程上通常从频域上分析信号,信号的频率范围制约其表示或传输信息的能力。常将承载信息的模拟信号所占用的频率范围称为信号或通信系统的带宽,单位为 Hz(赫兹),例如,某个系统的带宽为 20 MHz。而在计算机技术和信息论中,常使用比特作为信息量的单位,而作为度量信息传输能力的数据传输速率(以 bit/s,即比特每秒为单位),也习惯被称为数据通信网络的带宽,例如称某个城域网的带宽为 10 Gbit/s。而  $1\text{ k}=2^{10}=1\ 024$ 、 $1\text{ M}=1\ 024\text{ k}$ 、 $1\text{ G}=1\ 024\text{ M}$ 。

#### 4. 电路交换和分组交换

初期为话音服务的交换机在通信双方间建立的是专用的,在会话过程中一直工作的通信连接,占用专用的物理链路,过去常称为“电路”。会话结束后交换机才释放该电路。为了提高每条物理链路的利用率,可以将链路的占用时间分给不同会话使用,从而让多个会话时分复用在一起。交换机的这种工作方式称为电路交换(Circuit Switch,CS),在电路交换中,一个会话占用的时隙是在通信连接建立之初固定分配的。在语音或其他业务数据传输之前,需要先在交换机间传递预先定义的、起控制作用的特殊数据,称为信令。通过信令交互预先建立传输通道。它的优点主要在于可保障通信道路的畅通无阻,代价是要为每个会话预留出传输资源,即使某个会话可能在某个时刻并未充分使用该资源。电话网络在初期很长一段时间都使用电路交换,例如,其通话的建立和释放等操作由 7 号信令系统(Signaling System No. 7,SS7)中的 ISUP(ISDN User Part)信令完成。

计算机的“存储—处理”工作模式极大影响了通信网络的设计。基于电路交换的通信网络通过预先建立的通路将信息(常按固定的传输速率)直接从发送端发往接收端;而在计算机或数据通信系统中,“缓存—转发”的模式被通信设备所采用。发送端将信息数据组织成一个个的数据包(Data Packet,又称为数据分组),为每个数据包指明目的地后,发送给交换机。交换机将数据包缓存起来(存储的时间很短),根据其目的地把它们发往下一个交换机,直至到达接收端,这种工作方式称为包交换或分组交换(Packet Switch,PS)。在数据包传递过程中,各个交换机根据数据包的目的地信息以及当前的忙闲状态转发数据,而不需要预先设定传输路径和传输时机,这一传输方式称为无连接的(Connectionless)。相对的,将预先确定通信路径和时机的传输方式称为面向连接的(Connection Oriented)。

分组交换特别适合于传输大小不确定的数据包。在分组交换中,每个数据包的转发是独立的。尽管多个会话往往仍会共享同一个物理链路,但其所用的时隙是由各个交换机在转发时才决定的,这样可以只在一个会话真正需要时才分配网络资源。此时,一个物理传输媒质(如电缆或光纤)不再由几个会话通过固定的时分复用或频分复用独占,而是让多个会话按需使用该传输资源,只是有数据包传递的会话才使用资源,没有数据包时让给别人使用。资源是动态共享的,资源利用率取决于资源提供量与实际需求产生概率之间的匹配程度,而不是资源提供量与资源用户数量之间的匹配程度,因此资源使用效率更高。相对于 TDM 和 FDM,常用统计复用来强调分组交换的这个资源共享特点。

出现在 20 世纪 60 年代末的互联网雏形 ARPANET 就是一个分组交换网络,其他例子有 X.25 和帧中继系统等。20 世纪 80 年代,基于 TCP/IP 的分组交换网络(常称为 IP 网络)兴起。通过 IP 技术,原本各个独立发展、独立运作的通信网络开始相互连通,社会生活和生产的需求也推动了融合发展的进程,催生了最大的通信网络——互联网(Internet)。



互联网顾名思义是网络的联网(Inter-Net),即是由多个网络相互连接组成的端到端的网络。经过几十年的迅猛发展,代表分组交换的互联网成了连接全球的通信网络,服务着数以亿计的用户。任何一个通信网络都想要成为互联网的一部分,至少能与它兼容。原来以电路交换为主的 PSTN 和移动通信网络在 20 世纪末开始使用分组交换,使电路交换逐渐淡出历史舞台。

20 世纪 90 年代的异步交换模式(Asynchronous Transfer Mode, ATM)网络则是一个将电路交换和分组交换相结合的尝试。ATM 以面向连接的方式传输分组数据包(称为信元),可以兼有两种交换方式的优点。但由于 ATM 的设计过于复杂,降低了网络设备的性价比,未能在新世纪继续发展下去。不过,ATM 所使用的面向连接的标签交换(Label Switching)设计被广泛应用在互联网中,提供高速的数据包传送能力。分组和面向连接正在成为网络交换的主流方向。

### 5. 通信协议和系统架构

无论是无线通信还是有线通信,接收端和发送端都需要遵循某种预先约定的通用规则,称为通信协议(Communication Protocol)。

在点对点通信中,通信协议一般根据特定的通信内容、技术和物理传输媒质特性来设计和优化。随着数字通信和分组交换等技术的出现,使得通信系统所需的协议越来越复杂:首先,通信协议要规定信号在点对点物理链路上的收发和传输方式;然后,对于多个设备共享同一传输介质的物理链路,通信协议要解决传输介质的共享和使用方式;最后,通信协议还需规定所传输信息的组织表达形式。

最后一点对于数字通信系统更为重要。不论信源是模拟的还是数字的,都要转换为 0 和 1 的数字在链路上传输,收发双方需要约定好这些数字的含义,才能传递有用的信息。如果能为上述这几类不同目的设计相对独立的通信协议,那么每种协议就可以关注于各自的功能和实现。而将这几种协议组合在一起,可以提供完整的数据传输服务。因此,通信协议普遍采用了分层(Layering)的设计模式。例如上述三种协议可分别称为物理层协议、链路层协议和应用层协议。每一层都是从整个通信过程中抽象出来的,各层相对独立又相互关联。

一般来说,发送端和接收端使用同一层的协议完成通信的一部分工作;而在一个设备上,上一层协议的工作依赖于下层协议提供的服务,如图 1.3 所示。“服务”类似于编程语言的接口,具体实现对于上层是不可见的。协议一般定义如何在同层对等的两端间交换和解析信息,但不规定具体实现方式。协议的具体执行由每层的一个或多个功能实体(Entity)来完成。

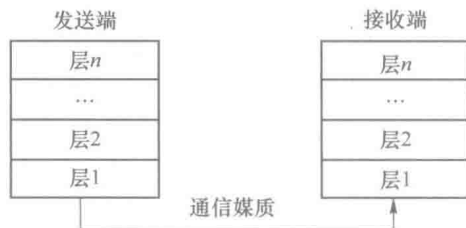


图 1.3 分层的通信协议

通信协议分层的好处如下:

(1) 每层通信协议负责本层的具体工作细节,上一层协议只需要按照层间约定的服务方