

高等学校教材

通信系统原理

(第二版)

上海铁道大学 张树京 主编
北方交通大学 冯玉琨 主审

中国铁道出版社

1999年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是在 1992 年第一版的基础上修订的,修订后的教材符合通信工程专业本科教学大纲要求。全书共分七章,包括,绪论、信号与噪声、模拟调制系统、模拟信号数字化、数字调制系统、差错控制编码、通信网概论等内容。各章均配小结和一定数量的习题,便于读者自学。带 * 号的章节为选学内容。

本书除供通信工程专业本科生教材外,也可作为相关专业本科和专科生的参考用书,同时也可供从事通信工作的科技人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理/张树京主编. —北京:中国铁道出版社,1999
高等学校教材
ISBN 7-113-03390-3

I. 通… II. 张… III. 通信系统-高等学校-教材 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45946 号

书 名:通信系统原理

作 者:上海铁道大学 张树京

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑:武亚雯

封面设计:薛小卉

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:464 千

版 本:1992 年 5 月第 1 版 1999 年 8 月第 2 版第 5 次印刷

印 数:12501—15000 册

书 号:ISBN7-113-03390-3/N·2

定 价:23.40 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

第二版前言

《通信系统原理》教材在 1992 年再版的基础上,对其内容进行了较大幅度的调整和更新,今天第二版又要和广大读者见面了。这次改版的指导思想仍然是突出重点、精选题材、深入浅出、不断更新,在基本保持原有篇幅的前提下将模拟调制部分减少到最低限度,同时强调数字调制在通信系统原理中的地位,特别是在第二版中新增了有关通信网概论的内容,相应地将原有的随机信号分析和信道复用两章已经分散纳入其它章节中去,并删去了最佳接收原理和信息论的基本知识两章,此部分内容将会在后续课程内安排。另外,考虑到各校教学安排有所不同,将信号与噪声、模拟信号数字化两章作为选学内容,便于灵活掌握。经过这次调整后明显地突出了数字通信和数字通信网络的内容,以符合通信技术和数字通信业务的发展趋势。通信系统原理新版教材的绪论部分也有较大改动,除了详细回顾 20 世纪通信技术的发展轨迹之外,又对面向 21 世纪的通信发展方向进行了概述;另外,还新增了有关通信业务发展的内容,因为在市场经济体制环境下,通信技术离不开通信业务的扩张,而通信业务的发展又是由通信市场的需求来决定的。

回顾近年来通信技术和通信业务的飞速发展离不开计算机技术在通信领域中的应用。从中低速率的数据通信开始,发展到千兆比特的超高速率数据传输,反映了计算机通信业务的需求。特别是通信网技术的日趋成熟,各种通信协议逐步实现国际标准化,使得通信技术推向全球化和个人化的理想境界。目前在通信领域中最活跃和最具潜力的因特网和个人通信技术,就反映了当今时代的需求。随着多媒体技术的发展,进一步将单一的数字通信推向高度多样化和综合化,尤其是音频视频业务的发展,出现了许多前所未有的通信内容,并提出了一系列服务质量要求,推进了通信技术的发展。先进的信号处理技术,给通信领域带来了程度不同的智能化,特别是通信网络的智能化介入大量内容不同的智能数据库,使得通信用户享受到信息时代的诱惑力。当今正在发展的电子商务、远程医疗、点播电视等广大群众最关心的活动,在通信网上逐一实现,使得通信业务得到进一步扩展。综上所述,近年来的通信技术已经跃上了一个新的台阶,作为高等学校的教材必须及时更新内容,赶上时代的步伐。

另外,近年来随着高等教育事业的发展,学科专业有了很大调整,新的交叉学科不断涌现,原有的专业面得到扩展。通信工程专业已从有线通信与无线通信分家的局面走向统一合并,计算机通信与数据通信单独设立专业的时代也将成为过去,这就有必要将通信系统原理教材的内容进一步扩充和延伸,因此这次修订增加了通信网概论一章,力图达到这一目的。

在本次修订中除了对其内容和结构作了比较大的调整外,在写作风格上也有不少改进。例如精选每章习题,以补充例题的不足,同时避免过多与本书配套的习题集重复。又如,在本书末增加了部分英汉名词对照索引,这些名词都是前修课程中没有出现过,而且在国际上已经通用的专业术语,对初学者在熟悉通信内容和查阅文献资料时自然是十分有用的。再如,对本书的主要参考文献也相应地作了调整,尤其可喜的是国内不少单位已经或者正在致力于通信原理方面的教材建设,这有利于提高我国的通信技术水平,同时也有利于普及和推广。

自从通信系统原理试用教材 1981 年出版,1990 年又出版为正式教材以来,一直受到广大

读者的支持和爱护,提出了许多宝贵的意见和建议;同时也得到了原国家教委和铁道部领导部门的热情鼓励和指导,曾先后被评为铁道部优秀教材二等奖、一等奖,国家级优秀教材奖和优秀教学成果二等奖。对于广大读者和各级领导的热情支持和帮助始终激励着我们把通信系统原理教材编写得更好,在培养我国通信专业人才的事业中贡献一份力量。

本次新教材的编写工作全部是由上海铁道大学完成的,其中第二和第三章由张百乾副教授编写,第四、第五和第六章由陈渔源教授编写,第七章由阮永良教授编写,张树京教授负责编写第一章和全书的主编工作。潘国俭同志为本书的文字处理和录入作了大量的工作,在此一并感谢。另外,我们还邀请到北方交通大学冯玉珉教授担任本书的主审,在编写过程中始终得到他的中肯意见和建议,在此表示感谢。同时还要感谢一直关心和支持本书的广大读者和中国铁道出版社,没有他们的帮助,本书也难以面世。

编者

1999年5月

第一版前言

《通信系统原理》作为高等学校通信专业本科的试用教材出版发行近十年了。在试用教材的使用过程中得到了各校广大师生的大力支持和爱护,提出了许多宝贵的意见和建议,同时也得到了国家教委和铁道部有关单位的热情鼓励和指导,曾先后被评为铁道部优秀教材二等奖和全国高等学校优秀教材奖。根据铁道部高等学校通信信号专业教学指导委员会的意见,结合多年来的教学经验和心得,对通信系统原理试用教材进行修订,希望能够得到广大读者的帮助和支持。

在近十年内通信技术得到了飞速发展,特别是在我国已将它作为先进技术列入重点发展的领域。通信技术的成就可以归纳为几个方面:一是传输手段的现代化,例如采用卫星通信和光纤通信等;二是通信业务的多样化,即改变以报话为主的单一通信业务,出现了数据传输、图像通信等多种非话业务;三是通信设备的数字化,除了它的抗干扰性能要比模拟通信好之外,还便于与计算机技术(包括硬件和软件)、信号处理技术等相结合,提高通信系统的有效性和可靠性;四是通信元器件的集成化,并将数字和模拟电路集成后构成功能块,形成积木式结构。这一系列可喜的变化,使通信科学技术水平跃居新的阶层,它以崭新的面貌迎接 21 世纪的到来。

通信技术的发展与各因素有关,其中最主要的是数字通信制式的推广应用、微电子器件和计算机技术的发展,以及信号处理技术(包括自适应技术)与通信技术的有机结合。这说明当代通信技术已经引进了许多新的概念、新的理论和新的方法,吸取了其它相关学科的研究成果,成为一门综合性学科。另外,由于通信技术有力地促进了生产力的发展,为社会生产和人民生活带来了效益,因此通信已经成为一门实用科学技术,应用的领域相当广泛。

基于以上情况,我们认为修订通信系统原理试用教材的必要性就十分清楚了,不仅通信专业的学生能够从中得到有关通信技术的各方面知识和技能,对于从事通信工作的广大科技人员也可以汲取到必要的营养和受到有用的启发。

根据通信系统原理课程的教学大纲要求,本教材应着重阐明通信系统的基本组成,以及评价各种通信系统的性能指标。为了突出重点内容,我们仍遵循编写试用教材时的指导思想,以分析各种调制技术作为贯穿全书的主线,通过系统性能的比较可以抓住通信系统的核心问题,为研究设计新的通信系统、掌握通信系统的发展方向奠定必要的基础。因此在编写本教材时紧密围绕着通信系统的有效性和可靠性这对矛盾,进行深入分析和反复比较,使读者加深印象,并有所启示。

目前在通信系统中所采用的调制技术大致可以分为两大类,即模拟调制技术和数字调制技术。属于模拟调制的有幅度调制、单边带调制和残留边带调制等,它们又可统称为线性调制系统。另一类模拟调制就是角度调制,它包括调频和调相,属于非线性调制系统。虽然目前对模拟调制方式已不能认为是通信系统的发展方向,但从通信发展历史来看,模拟调制在通信学科发展中的作用和贡献不容忽视,故在新教材中仍作保留。

属于数字调制方式的也有两大类,其中一类是基带数字调制,它包括脉冲编码调制和增量调制在内;另一类则是频带数字调制,它有幅移键控、频移键控、相移键控等。值得指出的是目

前出现了许多新的数字调制技术,例如自适应脉码调制,子带编码调制,最小相移键控等,我们在有关章节内都有所介绍,用来与传统的数字调制技术作比较。另外,在实际中还广泛应用多元数字调制技术,例如多元频率调制,多相调制等,在有关章节内也有介绍。

在信道编码方面考虑到应用较广的是线性分组码,因此对它的生成原理、译码方法和检纠错能力作为主要内容来介绍,而关于卷积码的内容由于篇幅有限,涉及不多。

为了适应数字通信技术的发展形势,在教材中加强了数字调制部分内容的比重,例如将数字信号的基带传输单独辟为一章,并增加了自适应脉冲编码调制等内容。有关脉冲模拟调制的内容已经在教材中删除,只保留线性模拟调制和角度调制这两章,它们可看作调制技术的基础,对初学者来说是必须掌握的。为了配合数字通信的发展,在教材中增加一章差错控制是有必要的,因为数字信号在信道内传输经常会受到突发性和随机性干扰,采用差错控制(信道编码)方法可以提高数字信号传输的可靠性。另外,其它章节的内容亦相应地作了调整,在不超过教学学时数要求的篇幅内力求做到少而精,既能重点保证必修的内容,又能反映近代先进科学水平,这两者相结合就形成了本教材的特色。

目前已经出版的国内外同类教材已有不少,尽管书名相近,但编写的内容却出入很大,它们也都从不同的观点出发来选取合适的内容和篇幅。在编写通信系统原理教材时我们考虑到通信专业教学计划的安排,对于后续专业课的内容,例如在数字通信和数据传输课程内将会详细介绍信道特性均衡、相干通信系统中的同步、以及信源编码技术等问题,为了做到既不重复,又不遗漏,我们在本教材中仅提出要求和介绍基本原理,其具体电路细节则在各门专业课内解决。对于先修课程,在教材中只保留信号分析与变换这一章,并将重点放在信号相关、卷积、以及功率谱和能量谱方面,而这些内容在信号与线性系统课程内不会作为重点。随机信号分析这一章的重点是分析随机信号的统计特性,特别是关于一阶矩和二阶矩的统计特征分析,这与数学中的随机过程内容有所不同。

本教材按照教学学时数 80 至 100 学时编写,因各校教学计划有所不同,任课教师对教材内容可以有所调整,进行舍选。另外,为了便于学生自学和教师备课需要,还编写了通信系统原理习题集,与本教材配套发行,供广大师生学习使用。

本教材的第一、四、五章由上海铁道大学张树京编写,第二、六、七、九、十二章由北方交通大学齐立心编写,第三、八、十、十一章由北方交通大学冯玉珉编写,全书由张树京负责主编。上海铁道大学周大纲主审。在审稿中还听取了北京邮电学院、天津大学、华东师范大学、石油部管理学院,以及北方交通大学、上海铁道大学和兰州铁道学院等任课老师的经验和建议,在此向上述各单位和有关同志表示最深切的谢意。

编 者

1992 年 3 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 通信技术的发展	1
第二节 通信业务	5
第三节 通信系统	9
第四节 本课程的目的和要求	12
第二章 信号与噪声	14
第一节 信号分析	14
第二节 能谱密度与功率谱密度	28
第三节 希尔伯特变换	34
第四节 信号通过线性系统	38
第五节 随机信号	41
第六节 噪声分析	58
第七节 随机信号通过线性及非线性系统	67
小结	71
附录	71
习题	72
第三章 模拟调制系统	75
第一节 概 述	75
第二节 线性调制系统	76
第三节 非线性调制系统	97
第四节 频分复用(FDM)原理	121
小结	122
附录	123
习题	125
第四章 模拟信号数字化	129
第一节 脉冲编码调制(PCM)	129
第二节 差分脉码调制(DPCM)	140
第三节 PCM 与 DM 的比较	146
小结	147
习题	148

第五章 数字调制系统.....	149
第一节 概 述.....	149
第二节 数字基带信号.....	150
第三节 数字信号的基带传输.....	155
第四节 数字信号的基本调制方式.....	164
第五节 多元数字调制.....	180
第六节 现代数字调制方式.....	188
小结.....	200
附录.....	201
习题.....	209
第六章 差错控制编码.....	211
第一节 概 述.....	211
第二节 简单的差错控制编码.....	215
第三节 线性分组码.....	218
第四节 循 环 码 	224
第五节 卷 积 码 	230
小结.....	236
习题.....	237
第七章 通信网概论.....	239
第一节 概 述.....	239
第二节 电路交换数据网.....	242
第三节 分组交换数据网.....	245
第四节 数字数据网和帧中继.....	254
第五节 局 域 网 	259
第六节 综合业务数字网.....	266
第七节 网络互连.....	273
第八节 接 入 网 	279
小结.....	281
附录.....	282
习题.....	283
英汉名词对照.....	284
主要参考文献.....	286

第一章 绪 论

第一节 通信技术的发展

一、模拟通信

人类在长期的劳动和社会实践中不断地创造了文字,丰富了语言,并利用它们充分地表达和交流人们的意志和感情,传递各种信息,推动了社会进步和经济发展。经过广大科技工作者的悉心研究和提炼加工,将传递信息和双向交流的工具逐步完善,其功能不断地由低级到高级发展,终于形成了一门独立的学科,这就是通信。

古代的通信方式比较简单,通信内容也很贫乏,例如人们使用信物、绳结、旗语、烽火、象形文字等作为通信工具,传递数字和文字信息。近代通信技术是与电的发明分不开的,因此也称电信技术,从19世纪30年代开始就有一系列的创造发明,如莫尔斯(Morse)发明的电报、贝尔(Bell)发明的电话、波波夫(Popov)和马可尼(Marconi)几乎同时发明的无线电等,这些创造发明为20世纪通信技术的大发展奠定了坚实的基础。

20世纪是通信技术发展的新纪元,它首先是从模拟通信开始的。所谓模拟通信是指在信道中所传递的信息是模拟量,相应的参数模型是模拟波形。最初是以电子管作为主要的电子器件,用来发送和接收传输信号;到40年代末期晶体管的出现,给通信技术带来了生机,为通信设备的小型化和提高通信设备的可靠性起到了关键性的作用。但当时所采用的电子管或晶体管主要是实现有源模拟电路的功能,因此它们可以说是模拟通信时代的标志。

20世纪初期所使用的传输线路一般是架空明线,后来改进为对称电缆和同轴电缆。由于电缆的通信质量明显优于架空明线,不仅传输带宽增加了成百倍,可以实现更多话路的复用;而且由于屏蔽效果好,通信质量大大提高。到30年代中期,由于采用了大同轴电缆传输语音,可以达到万路载波电话的复用程度;后来又可实现多路电话和电视信号同时传输,以充分满足广大用户对通信的需求。

在无线通信领域,最初是依靠短波频率产生信号,它是利用电离层的反射和折射原理,因此也称天波传输。其优点是传输距离远,但稳定性差,特别是要受到天气和时间的限制,通信质量不是很高。在某些应用领域,也可采用地波传输,它是依靠长波频率沿地表面传输信号,有时也可利用水面传输。其优点是通信稳定性好,但传输距离要受到地面(或水面)衰减的影响,不易实现远距离通信。从60年代开始发展微波和卫星通信,前者是在地面每隔20~30 km建立中继站,因此也称微波接力通信。由于微波是利用空间波传输信号,要受到地形和雨雪等因素的衰减,因此直接传输距离有一定限制,需要增加中继站数目来实现远距离通信;但它的传输容量很大,可以连接万路载波机实现巨量多路传输,并且稳定性也比较好,一度受到通信界的青睐。卫星通信是在发射通信卫星的基础上转发传输信号,也是使用微波频率,因此容量大、稳定性好。卫星地面站利用大口径的抛物面天线,可以接收由卫星转发过来的微弱信号,并由高灵敏度的接收机提取信息。

在无线通信中还有一族是移动通信,最初用于车载电话,后来发展为便携式,它们都是使

用超短波(例如400 MHz和800 MHz)传输信号。老一代的移动电话都是模拟的,无论是蜂窝结构还是集群制式,所传输的信号都是模拟信号,因此音质不是很好,尤其是在大城市里要受到高层建筑的屏蔽影响,会恶化传输质量。但由于它使用方便灵活,建设周期快,特别适合于移动体的通信联络,因此很受用户市场的欢迎,它的发展速度是最快的。

从技术上来分析,上述模拟通信的最大特点是采用模拟调制方式,最早是调幅制和调频制,后来发展单边带和残留边带调制技术。调幅通信的优点是占用频带窄,因此节省频率资源;但它的抗干扰能力差,因此通信质量难以提高。调频通信则正相反,它的抗干扰能力很强,通信质量有明显改善;但它要占用很宽的频带,不利于频率复用。单边带调制则是模拟通信中的新技术,它不仅占用频带最少,而且抗干扰能力也很强;但它在技术上要求很高,特别是同步指标很严格,因此要采用锁相技术和频率合成器,这类调制方式在远洋通信中首先得到推广。

回顾模拟通信发展历史,它在通信技术上有过辉煌的一页,在推动通信学科发展中发挥过积极而又重要的作用,但由于它固有的缺点无法克服,不得不逐渐退出历史舞台,被日益兴旺发达的数字通信所替代。

二、数字通信

自从1934年美国学者李佛西(Reeves)提出脉冲编码调制(简称PCM)的概念以后,应该说通信数字化的时代已经开始了,但数字通信的发展却是20世纪70年代以来的事情,数字通信的崛起说明了通信技术的重大革新和通信业务的飞速发展。随着时代的发展,通信用户不再满足于听清声音,而且还要看得见图像;通信终端不再是单一的电话机,而且要接传真机、计算机等一类数据终端;通信领域也不再是市内或国内,而且更多的是国际和全球通信;通信业务也不再是简单的报话业务,而且更多的是数据业务,甚至包括集声音、图像和数据为一体的综合通信业务。这些通信需求对模拟通信来说已经难以胜任,甚至无法实现,只有依靠数字通信技术来解决。

众所周知,数字通信与模拟通信相比较,具有一系列优点:第一,用数字信号传递信息易于再生,防止干扰的积累;第二,数字信号便于连接各种数据终端,特别是计算机终端;第三,数字信号易于加密,可靠性好;第四,数字信息易于实现通信业务综合化,有利于组网传输;第五,数字信息的电子器件易于高度集成化,有利于通信设备的小型化和灵活性;第六,数字信息易于加工处理,有利于扩大通信容量和提高通信质量。诸多优点正是说明它在与模拟通信的竞争中具有绝对优势,它代表了通信技术的发展方向。

数字通信的崛起首先要归功于数字调制技术的发展。在模拟信号数字化方面,开始是采用脉冲编码调制(PCM)和增量调制(DM),后来改进为自适应脉冲编码调制(ADPCM),使语音信号数字化后的传输比特率由原来的64 kbit/s减少到32 kbit/s,既提高了通信效率,又没有影响通信质量。为了进一步降低数字语音信号的传输比特率,可以采用数字信号处理技术,在保证通信质量的前提下出现了许多中速率(传输速率在9.6 kbit/s到32 kbit/s之间)和低速率(传输速率在9.6 kbit/s以下)数字语音方案,例如自适应预测编码(APC)、残余激励线性预测(RELP)、脉冲激励线性预测(RPELP)、多脉冲激励线性预测(MELP)、以及码本激励预测(CELP)等,后者已有国际标准,并首先在数字移动通信中推广使用,它的传输比特率只有4.8 kbit/s,而通话质量可以达到国际电话的音质要求。

在数字调制方面也有很大发展,从开始时的二元调制(包括幅度键控ASK、频率键控FSK和相位键控PSK)发展到多元调制技术,极大地提高了数字信号传输的频带利用率,而且改善

了误码性能。先后采用的多元数字调制技术有连续相位调制(CPM)、多元相位调制(MPSK)、正交幅度调制(QAM)、以及网格编码调制(TCM)等,特别是后者从1982年诞生以来引起了广大通信工作者的兴趣,它是将编码技术与调制技术有机地融合一体,依靠卷积码的良好抗干扰特性,即使在信噪比极差的条件下仍能改善误码性能;同时它又保持了极高的频带利用率,目前这种数字调制技术已经得到实用化。

为了传输高速率的多路复用数字信号,必须提供高速电子器件和宽带传输信道,它们是实现数字通信的基础技术。自从1948年出现第一只晶体管以来,微电子技术得到了突飞猛进的发展,如果以1960年的晶体管大小约有1cm为例,到1970年一只晶体管的大小就降到大约 $10\mu\text{m}$,1985年降到 $1\mu\text{m}$,到本世纪末可以降到 $0.1\mu\text{m}$ 左右,即一根头发丝的横截面内可以集成5万个晶体管。微电子技术的集成度是沿着单个晶体管发展到中小规模集成电路,再发展到大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路(VLSI)、和甚大规模集成电路(ULSI)的轨道前进,并且随着集成度的提高,微电子芯片的功能却越来越大,成本就越越来越低,例如1970年在一个芯片上只能存储几行文字内容,到1980年就能存储一整页文稿,到90年代已能存储一本书的内容,预计到21世纪初期就能将一部百科全书的内容全部存储在一个芯片上;而芯片的成本却以每年20%到30%的速度在下降。不仅是芯片的存储容量扩大,而且还表现在信号处理的速度加快,例如在1950年需要100年处理的数据量,到90年代就可以在千分之一秒内全部处理完毕,也就是说信号处理速度在过去40年间大约提高了 10^{12} 倍,这些成就有可能用快速信号处理芯片来集成灵巧的便携式移动电话(俗称手机)或笔记本式个人电脑。

宽带传输信道的发展离不开光纤通信和卫星通信技术。自从1970年发明光导纤维以来,一直受到人们的重视,并且开辟了光电通信的新时代。由于它在传输信号时具有一系列优点,例如频带宽、损耗低、串扰小、传输性能稳定等,因此对光纤通信技术的研究在世界各国掀起了高潮,传输速率越来越高,传输距离越来越长,特别适合于高速数据传输。在光纤通信中开始是采用短波长($0.85\mu\text{m}$)光纤传输,后来向长波长($1.3\mu\text{m}$)光纤发展,其原因是后者传输损耗更小,因而中继距离可以增长,有利于远距离传输。根据理论计算,理想的传输波长应该是 $1.55\mu\text{m}$,此时传输损耗接近于零。另外,在光纤结构上开始从多模光纤向单模光纤发展,后者在传输容量方面要比前者大得多。如果以1980年为例,一对光纤的传输速率为 44.7Mbit/s ,可以传输672路电话和1路电视;到1991年,一对光纤就可以传输 2488Mbit/s 速率,即容纳32256路电话和48路电视信号,可见在10年内传输速率和传输容量方面的发展速度是非常惊人的。

现在再来观察另一种宽带传输信道,即卫星通信。1965年美国发射第一代国际同步卫星,定位于大西洋上空,可以传输240路电话和1路电视信号,这就标志着卫星通信时代的到来。接着发射第二代国际通信卫星,定位于大西洋—印度洋上空;第三代国际通信卫星定位于太平洋—大西洋—印度洋上空,从此卫星通信可以覆盖全球,每个转发器的传输容量已增加到1200路电话和1路电视。到1992年已发射第七代国际通信卫星,除了进一步增加传输容量以满足广大用户需求外,还设法延长通信卫星的使用寿命,以便降低通信成本。除了国际卫星通信以外,各通信发达国家还研制和发射国内通信卫星,用来弥补光纤通信难以到达的地区,或满足军事、公安、交通、防灾等部门的通信需求。最早的卫星通信是采用模拟调制方式,即调频/时分多址(简称FM/TDMA)和频分复用多址(PCM/FDMA)两种制式。对于容量不大的低速用户,可以采用小口径终端数据卫星通信(简称VSAT)系统,它的优点是天线直径不到1m,比一般卫星地面站的天线要小得多,传输速率可达 57.6kbit/s ,有单独的网络管理和控制

功能,中等容量的用户可以采用频分复用多址系统,它要比模拟调制的频分复用系统容量提高4倍左右,例如国际商业服务的IBS系统,其传输速率由64 kbit/s到8.448 Mbit/s不等,可按用户需求来选择。如果是传输多路电话为主,则可采用IDR系统,它的传输速率与30路PCM电话的数据率相同,即2.048 Mbit/s。对于容量较大的高速用户来说,应该采用时分复用多址系统,其传输速率已可达到120 Mbit/s,相当于3300路PCM电话信号。如果在通信卫星上安置4个转发器,每个转发器的容量是25 Mbit/s,则其总的传输速率就可实现100 Mbit/s,代表了先进的数字卫星系统。在数字卫星通信中还有一类是移动卫星通信,例如已在交通运输和金融部门使用的全球定位系统(简称GPS),同样受到用户市场的欢迎。

三、通信技术的发展方向

尽管在20世纪内通信技术得到了突飞猛进的发展,但是随着基础技术的不断进步,特别是用户需求的不断提高,新的通信市场正在不断扩大,使得通信技术还将面临着进一步发展的机遇和挑战。通信专家预言,面向21世纪的通信技术将朝着网络化和个人化的方向发展。

通信网络同样也经历着从模拟到数字,从单一功能的网络到综合业务的发展过程。在模拟通信时代以步进制和纵横制交换机为代表的电路交换系统构成了模拟通信网络的主体,它包括地区电话网和长途电话网。自从数字通信的崛起,改用数字程控交换机来交换语音信号,所传送的数据是采用分组交换技术,因此出现了程控交换网和分组交换网。分组网最初是建立在模拟信道的基础上,由于传输速率无法提高,仅适用于低速用户,如金融信息业务等。以传输数据为主的数字数据网(DDN)和帧中继(FR)能提供中高速率的专线或租用线路业务,它们主要是依靠光纤传输,信道误码率可以达到 10^{-7} 以内,因此通信质量有了明显提高。它们除了用于传输数据外,也可以传输数字语音、数字传真等用户业务,特别是适合于计算机通信。从本世纪80年代起发展综合业务数字网(简称ISDN),开始时是窄带的ISDN,可以集成传输语音、数据、传真及一般质量的图像等综合信息,适用于可视电话、一般质量的会议电视等用户业务。但随着多媒体图像业务的大量发展,很快就过渡到宽带的ISDN(简称B-ISDN),它不仅传输速率很高,通信质量也很好;它不仅能传输静态图像,而且也可以传输高质量的活动图像,因此可以开展包括影视、动画、虚拟现实等多种用户业务,极大地发挥了数字通信网络的综合优势和增值效应。发展B-ISDN离不开异步转换模式(简称ATM)技术,它同时克服了电路交换速度慢和分组交换时延大的缺点,既适合于高速数据、又适用于高质量的活动图像传输,因此它是国际公认的新一代交换和传输模式。建立在ATM技术和光纤传输系统基础上的宽带综合数字业务网是代表了最先进的通信网络水平,也是今后网络发展的主流。新一代的光纤传输系统是采用掺铒光纤放大器和波分复用技术(简称WDM),它可以传输速率高达25 Gbit/s的高速数据信息,而且中继距离可以增大到80~140 km。另外,随着通信网络的覆盖范围越来越广,通信业务趋于国际化和全球化,因此迫切要求发展网络互连技术,由局域网(简称LAN)通过路由器或网关连同城域网(简称MAN),再进一步连通全国范围内的广域网(简称WAN),最后是构成国际互连网(俗称因特网),这是未来信息高速公路的原型。但目前它的数据传输速率只有45 Mbit/s,今后计划提高100~1000倍,能够连通世界上任何一台计算机,并开展多种多媒体通信业务,这才是真正的信息高速公路。在实现国际互连网的同时还离不开用户接入网的发展,它是指用户终端采用何种方式和手段接入到主干网上去。由于用户数量广大而分散,接入网的通信投资往往占有很大比例,因此各地都要根据实际情况建立相应的用户接入网,而接入网技术也就成为人们研究的一个分支。目前大多数采用拨号电话网(即公用电话交换网)或

专用(包括租用)线路接入,但它仅适合于窄带的中低速用户终端,开展一般的话音、数据或传真业务。随着多媒体通信业务的广泛开展,今后的接入方式将采用光纤到大楼或光纤到路边,甚至光纤到户,即由光电混合的接入网发展到全光纤的接入网,届时家庭用户或单位用户均可以使用高速数据终端,通过宽带的接入网直接跨上信息高速公路,开展多种多媒体业务活动。

通信的目标不仅要实现全球化,而且还要达到个人化,这里是指未来的通信能将世界上任何人、在任何时候和任何地方都可以保持联系,不仅要能通话,而且还要传送数据甚至图像,这就是要发展个人通信的原因。显然,发展个人通信技术的基础是无线移动通信,近十年内移动通信的发展速度是惊人的,据统计全世界移动通信用户的增长率每年在20%以上,有的国家达到50%,其中包括无绳电话在内。在无线移动通信中最主要的是蜂窝通信技术,它是将基地台功率所能覆盖的服务区域划分为呈蜂窝状的许多小区,通过频率重用技术来增加用户数目。当移动台越区时需要自动切换可用频率,其功能由基地台的调度中心来完成。当异地使用时,蜂窝通信系统还具有自动漫游功能,以实现国内甚至国际长途业务。由于城区建筑物的屏蔽效应,在电波传播中会产生多径干扰,特别是在移动通信用户容量增加的同时,会带来路间串扰,这些都会使通信质量下降。为此,应当适当地减小蜂窝小区的直径,适当增加基地台的数量,可重用频率也可随之增加,用以解决增加通信容量和保证通信质量之间的矛盾,这就称为微蜂窝技术。无线移动通信同样也是由模拟调制发展为数字调制,第一代蜂窝通信采用模拟调频(FM)制式,多址方式则采用频分多址(FDMA);但从80年代开始就研制数字移动通信,首先是欧洲电信联盟提出GSM系统作为泛欧数字式蜂窝通信的标准,并得到推广使用,这是第二代蜂窝通信技术的代表。GSM系统采用数字语音调制,传输速率为13 kbit/s;多址方式则采用时分多址(TDMA),同时加强了网络控制功能,以进一步增加系统容量和提高通信质量,开展国际漫游业务。美国提出的码分多址(CDMA)技术是更先进的移动通信系统,它作为第三代无线移动通信的标志,这就是从90年代开始研制的个人通信系统(简称PCS),它具有更强的通信功能,并允许开展多媒体通信业务,因此受到广大通信用户的欢迎。

所谓个人通信就是要做到通信服务到个人,而不是服务到配置固定号码的电话机,因此个人通信所使用的电话号码应该在世界范围内是唯一的,如同注册国的个人身份证号码一样。个人通信还要求不受任何时间和地点的限制,因此它往往是与数字卫星通信或光纤通信系统有机地联系在一起,构成全球通信网。目前已经提出许多种实现个人通信的方案,其中以国际电信联盟所提出的未来公众陆地移动通信系统(FPLMTS)和WCDMA为最典型,它是面向21世纪的新一代移动通信系统,即个人通信系统。按照设计目标,它所组成的网络应该在任何地点(包括室内或室外、乡间或城市、固定点或移动点),能够传输任何类型的信息(包括文字、数据、语音或图像),提供多种接口标准和通信协议,并能够与国际卫星通信网或宽带综合数字业务网相连的全球通信信息网络。在个人通信系统中广泛应用数字调制和无线网络技术,以及通信软件的国际通用化和标准化,因此目前大量工作还处在局部试验阶段,但距离真正实用化的时间已经为期不远了。

第二节 通信业务

一、传统的通信业务

传统的通信业务是从电报、电话开始的,故统称报话业务。但随着通信技术的发展,报话业务逐渐延伸和扩充,例如电报业务还包括公众电报、用户电报以及传真电报等,而电话业务也

扩大到可视电话、会议电话等。与此同时,新的通信业务又不断出现,主要是数据通信和图像通信,前者又细分为低速、中速和高速数据传输,后者又有静态图像与活动图像之分。因此,一般常将传统的通信业务划分为话音业务和非话业务两大类,前者始终是通信业务的主体,据专家预计到本世纪末,电话业务仍将占有世界电信市场的70%以上。同时随着用户需求的不断更新和提高,非话业务的发展速度也很快,据统计在近20年内,世界非话业务平均年增长率为25%,这说明通信业务的增长要大大高于国民经济的增长速度,而且通信和信息已成为世界主要国家的支柱产业。

电话通信是属于双向的交互型信息传输系统,由于它的实时性和操作方便性,一直受到用户的青睐,我国电话普及率已从不到1%提高到接近10%,某些大城市已达到30%以上,而在通信发达国家可达到70%~90%,它对于交流和传递信息、推动第三产业的发展起到重要作用。在近20年内,由于移动电话的推广应用,又进一步扩大了电话业务,据统计世界移动电话业务的平均年增长率已达到50%,成为通信业务中增长最快的一个领域。由于卫星通信和光纤通信系统的介入,国际长途电话业务量猛增,不仅通话质量稳定、清晰度高,而且通信成本逐步下降,通信费用降低,成为发展用户市场的主要动力。

电报业务是属于单向的记录复制型信息传输系统,最早是采用公众电报方式,目前已接近淘汰,改为用户电报方式,将报文直接送到用户手里,不再需要报务员翻译。但是用户电报无法传递图表信息,因此从80年代开始广泛使用传真电报,数字传真机的传递速度很快,传递一页A₄型标准纸的平均时间不到1min,而且传真质量清晰可靠,成为公务和商务通信中的主要业务内容。由用户电报发展到传真电报,减少了人工传递报文的过程,大大提高了办事效率,因此它的用户市场也是与日俱增。

在非话业务中发展最快的首推数据传输业务,最早是在公众电话网上传输低速数据业务,例如平均传输速率从1200bit/s发展到4800bit/s。但是随着调制解调器的改进,数据传输速率可从9600bit/s提高到56kbit/s,它称为中速数据传输业务,不仅能传送数据,而且还能传送数字语音和压缩后的数字图像,因此这类用户市场也在逐步扩大,应用领域得到发展。但是对于高速率的数据传输业务,则需要专门的计算机通信网上传输,它的传输带宽要比公众电话网宽得多,而且传输质量也要好得多。

有一类图像通信业务是与传真和数据传输相结合的,这就是图文传输业务,也可称为可视数据(Videotex)或图文电视(Teletex)。前者是利用公众电话网提取数据中心的文字和图形信息,可以接在家用电视机上显示,一般是用于检索或查询业务,在商务通信中很方便。图文电视则利用电视台发射电视信号的回扫期间传递文字或图像信息,可以在观看电视的同时传递天气预报、商业广告、金融信息及科技动态等,对用户来说很实用,但上述两种通信方式所用的电视机必须具备外加的通信接口。

图像通信最主要的内容应该是传输活动图像,例如可视电话和会议电视业务,它们的通信质量要视传输信道而定。一般来说,宽带的传输信道(如同轴电缆、光纤、微波或卫星信道)可以提供较高质量的活动图像,例如每秒10帧以上,最高可以达到每秒30帧;而窄带信道(如普通电话线或移动通信信道)即使采用压缩技术后也只能传送每秒5帧以下的活动图像,因此与电视信号相比较,其通信质量差得很多,一般用于工业部门或对交通运输作业的监控等领域。

由于人们接受客观世界的信息大约30%来自听觉器官,而70%来自视觉器官,因此视觉型信息传输系统在社会经济活动中所处的位置有多么重要,这就是图像通信作为后起之秀在通信业务中飞速发展的主要原因。

二、计算机通信业务

分布于各地的计算机联成网络后,其输入和输出数据都要通过通信信道来传输,这就是计算机通信,它主要是用来传输高速率的数据信息,计算机通信一般是采用专门的传输信道和通信网,并使用国际上统一的通信协议标准。由于它的传输速率很高(例如 1Mbit 以上),因此必须采用综合布线系统或光纤传输系统,而普通的电话线就难以胜任。依据计算机网络的规模大小和覆盖范围,可以分为局域网(LAN)、城域网(MAN)和广域网(WAN)几种,它们的应用领域也有所不同。

局域网一般用于机关企业、学校、医院等独立的企事业单位,可用作内部管理,例如建立各类管理信息系统(MIS)、办公自动化系统(OA)、智能大楼系统(IB)等,但它们都是开放式的,具有通信接口可以与外部网络以及远程终端连接,开展计算机通信业务。目前在局域网上不仅可以传输数据信息,而且也可以传输数字语音和图像信息,这时在计算机终端上要具备各种接口和通信协议。局域网的拓扑结构主要有三种,即总线网(又称以太网)、环形网(又称令牌网)和双环网(又称 FDDI 网),它们的通信协议不同,但传输速率都很高,目前已达到 10 Mbit/s 以上,最高可达 1 000 Mbit/s。局域网的覆盖范围大多在 10 km 以内,可以连接 100 台左右的计算机终端,典型的应用领域如工厂自动化、管理现代化等。

将局域网通过路由器或网关,与其它局域网相连,就可以构成城域网,它的覆盖范围大致与一个城市的规模相近,例如网络直径为 50~100 km。在城域网上可以充分发挥信息资源共享的优势,因此它主要面向社会公众服务,例如开展各种查询、检索信息业务和电子商务活动,在科技、金融、商业、服务等领域内应用,对促进两个文明建设均会起到重要作用。由于城域网的系统容量很大,用户终端很多,传输的各类信息是巨量的,并且要求通信质量可靠,因此要建成一个城域网需要大量投资,并且要解决许多复杂的技术问题,对通信人才的要求也是很高的,目前只能在少数具备条件的城市和地区首先建成。但从通信用户的需求来看,城域网业务的发展必然是很快的,以迎合信息社会的到来。

将城域网再进一步扩大,直到覆盖国内各大城市,则可构成全国性的广域网,在这个网上可以建立各类信息管理系统,例如金融信息管理系统、科教信息管理系统、医药卫生管理系统等,它们主要面向各专业部门,同时也可面向社会公众。目前,广域网的概念已扩展到国际社会,出现了第一个国际互连网络,它是覆盖几十个国家、连接数百万台计算机、为数千万个用户服务的超大型计算机网络,并且还在以惊人的速度发展。它的应用主要是开展电子邮件、文件传送、远程登录、信息查询、专题论坛等业务,特别是用户使用 WWW 浏览器可以检索到图文并茂的各种文献资料和商业广告,对推动科技进步和促进电子商务活动作出了杰出贡献。另外,目前还在发展网上通信业务,例如可视电话、会议电视、远距离教育、远程医疗会诊等,特别是与文娱活动相结合,利用互连网络来开展电子游戏或点播电视等业务。由于在国际互连网上连接的用户是巨量的,传送的又是超文本多媒体信息,因此它要求提供超高速率的传输信道,并且要求实时可靠,目前的因特网已经难以胜任,计划在本世纪末建成真正的信息高速公路,即第二个因特网(Internet II)。它是建立在最先进的 ATM 网络基础上,其传输速率将比目前的因特网提高 100 倍以上,并且开发出功能更强、内容更丰富的通信软件,以适应日益发展的各种多媒体通信业务需求。

三、多媒体通信业务

多媒体通信是将先进的通信网络和功能强大的个人计算机有机地结合在一起,开展以图像为核心、同时伴有语音、文字和数据的多媒体信息传输业务。由于它将计算机的交互性、通信网络的分布性和电视画面的真实性同时得到充分地发挥,因此开展多媒体业务受到计算机、通信、文娱界、商业、交通运输业等诸多领域的欢迎,它与信息高速公路一样,成为目前人们最感兴趣的话题之一。同时,由于开展多媒体业务的需要,极大地推动了计算机技术和通信技术的发展,例如宽带综合业务数字网、国际互连网、多媒体数据库、虚拟现实等技术。目前最有代表性的多媒体通信业务是会议电视和点播电视,它们都属于多点通信业务,具有广泛的应用意义。

多媒体会议电视系统是利用计算机终端信息数据库和通信网络等多种资源,创造出—个能够召开会议的良好环境,将分布在各地的参加者都能使用各自的终端来参加会议,自由地交谈和发表意见,并利用电子白板、扫描仪、录像机等外部设备来展示各类图表或活动图像片断,以便加强发言内容的真实性,它的实现可以达到面对面会议模式的同样效果。类似的通信业务还有多媒体远距离教学系统,它提供实时的交互式授课或讨论环境;多媒体远程医疗会诊系统则提供异地会诊的环境在用户终端上可以显示各种病例和医疗信息,使医生充分了解病情,并通过交谈后作出诊断结论及处方。还有一类分布式多媒体通信业务是所谓计算机支持的协调工作系统(简称 CSCW),它主要是为科学家提供群体工作的环境,但它不要求实时性,使科学家在各自的工作时间内撰写论文、修改报告或整理实验资料等,然后将已经完成的工作存储在强大的信息数据库内;与此同时可以浏览或阅读其他科学家的论文,听取他们的意见,并参与讨论和交流。

上述这些多媒体通信系统都是面向单位或专业部门的,因此属于专用通信业务。点播电视则面向社会大众,它属于公众通信业务,并将通信与文娱结合在一起,使通信业务的范围进一步得到扩展。点播电视(VOD)的特点在于用户可以按需点播电视节目,但它不要求实时性。用户根据事先预告的节目单可以通过键盘输入节目编号和用户账号,电视台就通过专用频道给预订的用户播放所选的电视节目,并根据节目内容和播放时间来自动计费。由于上行和下行的信息量严重地不对称,因此开展这类通信业务的网络结构是特殊的,例如上行信息(主要是数据)可以采用电缆传输,而下行信息(主要是活动图像)必须采用光纤传输。另外,为了提高电视画面的质量必须采用先进的数据压缩技术,在提高平均压缩比的同时,要保证活动画面的连续性和逼真性,这在技术上会带来很大难度。类似的多媒体技术还有动画片制作业务,这在影视界已经掀起高潮,特别是在科幻片的制作中。

网上的多媒体通信业务也正是方兴未艾,这里主要是指多媒体邮件和超文本信息服务,后者也可称为在线页面业务。用户在自己的办公室或家里就可以使用计算机终端通过网络来阅读报刊杂志或者邮件文章,它们都是声文图并茂的有声可视读物,读者接受多种媒体的信息,真正享受到赏心悦目的乐趣。超文本信息服务也是交互式的,用户可以按需来选择文本的种类和内容,同时也可以记录下来(或称下载)储存在磁盘或光盘上。这类业务的扩展就可用于电子出版行业,它们将有纸书刊变成无纸的电子出版物,不仅储存信息的容量大,而且具有重量轻、体积小、易保存和成本低等优点。开展这类业务的前提是要在网上建立功能强大的信息数据库,也可称为电子图书馆,它包揽各种各样的信息,并分门别类地编制成图书目录;同时还要开发各种方便使用的浏览器,用户直接在计算机终端上进行操作。多媒体邮件则是电子邮件业务

的扩展,它在邮件上包含声、图、文等多种媒体信息,使收件人感受到更加亲切和逼真的内容。

四、增值业务

所谓增值功能是指除了通信功能以外,在原有的通信网上增加信息服务的功能,因此相当于在通信网上再增设一个虚拟的信息网,后者又可称为智能网或增值网。在智能网上开展的信息业务就可称为增值业务或智能业务,例如建立虚拟的专用信道、开通自动声讯服务系统、增设话音信箱、电子投票站、对方付款电话等。事实上,在现有的程控电话网上已经存在许多免费或收费的增值业务,例如国内外长途直拨、缩位拨号、转移呼叫、遇忙回呼、呼叫等待、热线服务、闹钟服务、三方通话、呼出加锁、免干扰服务以及会议电话等,它们都是利用各种提示符和提示音的组合编码来实现的。前面提到的超文件信息服务则是更高级的增值业务。建立增值网的关键是开发通信软件和建立信息数据库,前者主要完成控制和调度管理功能,特别是计费功能;后者则是各类信息中心,提供信息源。随着计算机通信和多媒体业务的大量发展、通信网络的日益先进和完善,未来的智能性增值业务还会越来越多;通信技术和信息技术完美地结合在一起,将会使增值业务越来越高级,增值效果也会越来越大。

第三节 通信系统

一、通信系统的组成

总的来说,通信系统是由发射机、传输信道和接收机三大部分组成,其中发射机的功能主要是发送信号,它先将采集到的原始信息转换为相应的电信号,然后再要经过放大、调制、滤波等一系列加工处理后,将信号送入传输信道,这个过程是为了使信号的特征与传输信道相匹配,以便提高传输效率和可靠性。接收机的功能则正好相反,它将从传输信道送来的信号再经过滤波、放大、解调等一系列加工处理后,设法使原来发送的信息准确无误地恢复原样,相当于完成与发射机相反的过程。由于接收到的信号已经过信道传输,不可避免地会给传输信号带来失真和干扰,因此在接收机里的信号处理任务就相当复杂,要根据不同的传输信号和传输信道来设计对策。传输信道是通信系统中不可分割的一部分,但按照功能来区分可有狭义信道和广义信道两大类,前者通常就是指传输线路,例如有线传输线路包括架空线、电缆、光缆等,而无线传输线路则包括天线、馈线和传播电磁波的自由空间等。广义信道则比较复杂,它应包括信号调制以后,直到信号解调以前的全部传输过程,故也可称为调制信道。显然,狭义信道的传输特性往往仅限于传输介质本身,例如传输损耗、相移、延时以及天线增益等;而广义信道的传输特性则着重在幅度频率特性、相位频率特性、非线性失真,以及信噪比、误码率等整体性能指标方面。通信系统按照传输信号的不同,也可分为模拟通信系统和数字通信系统两大类,前者以传输模拟话音信号为主,因此是传统的通信方式,它在通信历史中曾发挥了重要作用。数字通信系统则可传输多种数字信号,包括数字化后的话音信号(简称数字语音)、数据信号、数字图像信号等,特别是在计算机通信和多媒体业务大量发展后,这类通信系统已经逐步替代模拟通信系统,成为通信方式的主流。

模拟通信系统的组成如图 1-1 所示,它在发端从信源采集到信号后经过调制器就直接送入广义信道传输,在收端则将广义信道送来的信号经过解调器恢复成原始信息后传给信宿。由此可见,在模拟通信系统中从信源到信宿,除了广义传输信道外就剩下调制器和解调器,它说明调制和解调功能在模拟通信系统中的重要地位。事实上,由于原始信号的特性往往与广义信