



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

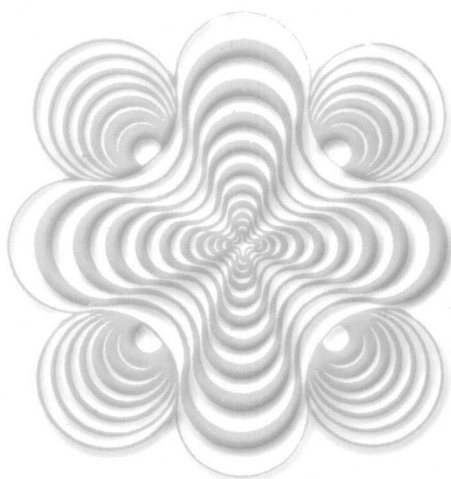
通信原理课程建设教材系列

通信原理

TONGXIN YUANLI

(第3版)

周炯槃 庞沁华 续大我 吴伟陵 杨鸿文 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理课程建设教材系列

通信原理

(第3版)

周炯槃

吴伟陵

庞沁华

杨鸿文

续大我

编著



北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了通信系统和通信网的基本原理与基本分析方法,是通信及信息专业的专业基础课教材。

全书共 13 章,内容包括通信系统及通信网的基本概念、确定信号及随机过程、模拟通信系统、数字基带传输、数字频带传输、信源和信源编码、信道和信道容量、信道差错控制编码、扩频通信、正交频分复用多载波调制技术、通信系统的优化、通信网的基本知识。

本书概念清楚,取材新颖,书中列举了大量例题,还附有习题及部分习题答案。本书可作为高等学校通信工程、电子工程和其他相近专业本科生的教材,也可供通信工程技术人员和科研人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/周炯槃等编著. —3 版. —北京:北京邮电大学出版社,2008

ISBN 978-7-5635-1813-5

I. 通… II. 周… III. 通信理论—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 106131 号

书 名: 通信原理(第 3 版)

作 者: 周炯槃 等

责任编辑: 李欣一

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: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 32.25

字 数: 798 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2002 年 8 月第 1 版 2005 年 11 月第 2 版 2008 年 8 月第 3 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1813-5

定价:49.00 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 ·

第3版序

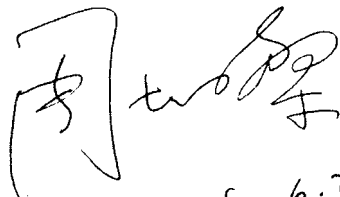
2002年8月本书第1版出版以来,在北京邮电大学电信工程学院、信息工程学院、电子工程学院三个学院的本科教学中,已作为教材讲授了六年。应众多读者的需求,已先后印刷了10次。

近几年来,鉴于以蜂窝移动为代表的各类无线通信业务猛增,人们已不满足于传送语音,还要求传送高速数据和活动图像。因而,需要在有限的无线信道频带内,传送高速数据、宽带信号。然而,高速数据、宽带信号,在通过移动的时变多径信道传输时,会引起严重的衰落现象,通信无法保证。为此,通信理论工作者研究出了很多抗各类衰落和抗干扰的新对策,如:LDPC码、正交频分复用(OFDM)多载波调制、多天线系统、多用户检测、链路自适应技术等新理论和新技术。本书第3版的目的是要将上述适合于本科教学的新的通信基本原理加以补充。故在原书内容做适当删减基础上,新增如下内容:在第9章“信道编码”中增加了性能接近于香农极限的“LDPC码”(由杨鸿文教授编写)。将原第10章“正交码与伪随机码”改名为“扩频通信”,突出了扩频通信及其抗干扰、抗衰落和码分多址的内容(由续大我教授编写)。第11章和第12章是新增的。第11章讲授“正交频分复用多载波调制技术”,由于它能有效抗频率选择性衰落,可望成为第四代蜂窝移动通信空中接口的候选技术(由庞沁华教授编写)。第12章讲授“通信系统的优化”,用信息理论论述在有效性、可靠性指标要求下通信系统优化的基本思路(由吴伟陵教授编写)。第13章“通信网的基本知识”中,增加了下一代通信网发展方向的内容(由杨鸿文教授编写)。

通信事业日新月异,新的通信理论不断涌现。本书将本着不断推陈出新的宗旨,满足我国通信事业的发展需要。

本书第3版由周炯槃院士、庞沁华、杨鸿文统编定稿。

书中不当之处,敬请指教。



2008.6.23

合订本前言

本书第一版(上)、(下)两册自2002年出版以来,先后5次印刷。作为“通信原理”课程教材,本书既有助于教师讲授,也便于读者自学并掌握通信的基本原理和基本分析方法。

本次合订,在原有内容的基础上作了适当地删减,并增加了部分新内容。

三年来,北京邮电大学电信工程学院桑林副院长、杨鸿文教授和李卫东、郭文彬、彭涛、尹长川、郝建军、刘丹谱等教师;北京邮电大学电子工程学院刘杰教授;北京邮电大学信息工程学院林家儒教授等,在使用本教材的过程中,提出了宝贵的意见,作者在此一并深表谢意。

本书的出版,得到了北京邮电大学教材委员会两位主任赵尔源教授和乐光新教授的长期关心和支持,我们再次衷心感谢。

这次出版后,书中可能还会难免出现差错,恳请指正。

作者
2005年9月

第 1 版序

通信乃是互通信息。

20 世纪 80 年代以来,通信技术与计算机技术及微电子技术相互促进、迅猛发展。通信产业已成为当今世界生产力的重要领头产业。它极大地推动了各国经济的发展,使人类步入了信息社会。

通信技术日新月异的发展,使更多的人期望掌握通信的基本原理。本书的宗旨是系统、深入地阐述通信系统和通信网的基本理论。

本书系四位作者多年来从事通信与信息学科本科生和研究生的教学与科研实践的总结。按认识论规律由概念的建立给出定量分析,且注重理论联系实际。在介绍基本理论的基础上,力求体现近年来国内外通信技术的发展。

为帮助读者掌握通信的基本原理及分析方法,提高运算能力,书中列举了许多例题,并附有大量习题及部分习题答案。习题中包含历年来学生作业、本科试题及考研试题的精选。

全书共十一章,第一章绪论,从通信发展简史及展望引导出通信的基本概念与通信系统及通信网的基本构成。第二章确定信号分析,第三章随机过程,这两章是分析通信系统的数学工具,如果读者已有先修基础,可将其作为复习内容。第四章模拟通信系统,阐述目前正在应用的各种模拟调制方式的基本原理及其性能分析。第五章至第十章阐述数字通信系统的基本理论。第五章数字信号的基带传输,第六章数字信号的频带传输,这两章是数字通信传输系统的基本理论。第七章信源和信源编码,第八章信道和信道容量,第九章信道差错控制编码,这三章是仙农信息论的基本理论。第十章阐述正交编码与伪随机序列的基本原理及其应用。第十一章介绍通信网的基本原理,阐述交换的基本原理及信令和协议的基本概念。全书分为上、下两册,一至六章为上册,七至十一章为下册。

本书可用作高等学校本科生通信工程专业、电子与信息专业以及其他相近专业的专业基础课的教科书。全书可在大学三年级分两学期授课。

本书也可作为通信工程技术人员的参考书。读者欲仅限于掌握模拟通信,则只需阅读前四章;若仅限于掌握数字通信,不必阅读第四章。

全书由周炯槃院士主编并编写第一、十一章,由续大我教授编写第二、三、八、十章,由庞沁华教授编写四、五、六章,由吴伟陵教授编写第七、九章,最后全书由周炯槃、庞沁华统编定稿。

鉴于首次正式出版,难免有不妥之处,敬请指正。

周炯槃

2002 年 8 月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 绪论

1.1 引言	1
1.2 通信发展简史和展望	2
1.3 通信系统和通信网的构成	5
1.3.1 概述	5
1.3.2 信源、信宿和信号	6
1.3.3 信源编译码设备	6
1.3.4 信道及信道编译码设备	7
1.3.5 交换设备	7
1.4 本书的总体结构	8

第 2 章 确定信号分析

2.1 引言	9
2.2 确定信号的分类	9
2.3 周期信号的傅里叶级数分析	10
2.4 傅里叶变换	11
2.5 单位冲激函数的傅里叶变换	12
2.6 功率信号的傅里叶变换	13
2.7 能量谱密度与功率谱密度	16
2.8 确定信号的相关函数	18
2.9 卷积	21
2.10 确定信号通过线性系统	22
2.11 希尔伯特变换	24
2.12 解析信号	27
2.13 频带信号与带通系统	28

第 3 章 随机过程

3.1 引言	35
3.2 随机过程的统计(概率)特性	35
3.3 平稳随机过程	37
3.4 高斯随机过程(正态)	41

3.5	平稳随机过程通过线性系统	43
3.6	高斯白噪声	46
3.7	窄带平稳随机过程	48
3.8	余弦波加窄带平稳高斯随机过程	54
3.9	匹配滤波器	55
3.10	循环平稳随机过程	58
	习题	59

第4章 模拟通信系统

4.1	引言	61
4.2	幅度调制	62
4.2.1	双边带抑制载波调幅	62
4.2.2	具有离散大载波的双边带幅度调制	68
4.2.3	单边带调幅	71
4.2.4	残留边带调幅	74
4.3	角度调制	76
4.3.1	调频及调相信号	76
4.3.2	角度调制信号的频谱特性	78
4.3.3	角度调制器与解调器	80
4.4	线性调制系统的抗噪声性能	83
4.4.1	双边带抑制载波调幅系统的抗噪声性能	84
4.4.2	单边带调幅系统的抗噪声性能	85
4.4.3	具有离散大载波的双边带调幅系统的抗噪声性能	86
4.5	角度调制系统的抗噪声性能	90
4.5.1	角度调制系统的抗噪声性能	90
4.5.2	频率调制的门限效应	93
4.5.3	预加重滤波与去加重滤波	94
4.6	频分复用及其应用实例	96
4.7	超外差接收机	99
4.8	无线通信系统设计基本原理	100
4.8.1	综述	100
4.8.2	接收机的噪声系数与等效噪声温度	102
	习题	109

第5章 数字信号的基带传输

5.1	引言	113
5.1.1	数字基带信号及数字基带传输	113
5.1.2	信息量单位、信息速率及码元速率、误比特率及误符率、频带利用率	114
5.2	数字基带信号波形及其功率谱密度	115

5.2.1	数字脉冲幅度调制	115
5.2.2	常用的数字 PAM 信号波形(码型)	116
5.2.3	数字 PAM 信号的功率谱密度计算	121
5.2.4	常用线路码型	126
5.3	在加性白高斯噪声信道条件下数字基带信号的接收	131
5.3.1	利用低通滤波的接收	132
5.3.2	利用匹配滤波器的最佳接收	136
5.4	数字 PAM 信号通过限带基带信道的传输	140
5.4.1	数字 PAM 基带传输及码间干扰	141
5.4.2	无码间干扰基带传输的奈奎斯特准则	142
5.5	在理想限带及加性白高斯噪声信道条件下数字 PAM 信号的最佳基带传输	146
5.6	眼图	148
5.7	信道均衡	149
5.8	部分响应系统	156
5.9	符号同步	161
	习题	165

第 6 章 数字信号的频带传输

6.1	引言	171
6.2	二进制数字信号的正弦型载波调制	172
6.2.1	二进制通断键控	172
6.2.2	二进制移频键控	183
6.2.3	二进制移相键控	188
6.2.4	2PSK 的载波同步	192
6.2.5	差分移相键控	194
6.3	四相移相键控	196
6.3.1	四相移相键控	196
6.3.2	差分四相移相键控	201
6.3.3	偏移四相移相键控	203
6.3.4	$\pi/4$ -差分四相移相键控	206
6.4	M 进制数字调制	208
6.4.1	数字调制信号的矢量表示	209
6.4.2	统计判决理论	215
6.4.3	加性白高斯噪声干扰下 M 进制确定信号的最佳接收	217
6.4.4	M 进制振幅键控	221
6.4.5	M 进制移相键控	226
6.4.6	正交幅度调制	233
6.4.7	M 进制移频键控	238
6.5	恒包络连续相位调制	244

6.5.1 最小移频键控	244
6.5.2 高斯最小移频键控	251
习题	260

第7章 信源和信源编码

7.1 引言	266
7.2 信源的分类及其统计特性描述	267
7.3 信息熵 $H(X)$	269
7.4 互信息 $I(X;Y)$	276
7.5 无失真离散信源编码定理简介	277
7.6 无失真离散信源编码	280
7.7 信息率失真 $R(D)$ 函数	282
7.8 限失真信源编码定理与限失真信源编码	286
7.9 连续信源的限失真编码	287
7.9.1 模拟信号数字化基本原理	287
7.9.2 采样	289
7.9.3 标量量化	294
7.9.4 脉冲编码调制	300
7.9.5 时分复用	304
7.9.6 矢量量化	306
7.10 相关信源的限失真信源编码	309
7.10.1 预测编码	309
7.10.2 变换编码	314
习题	322

第8章 信道

8.1 引言	326
8.2 信道的定义和分类	326
8.3 通信信道实例	327
8.3.1 恒参信道	327
8.3.2 随参信道	328
8.4 信道的数学模型	329
8.4.1 连续信道模型	329
8.4.2 离散信道模型	330
8.5 恒参信道特性及其对信号传输的影响	331
8.6 随参信道特性及其对信号传输的影响	335
8.6.1 随参信道的数学模型	335
8.6.2 随参信道对信号传输的影响	336
8.6.3 抗衰落措施	340

8.7 分集接收	340
8.8 信道容量	341
8.9 信道编码定理	345
习题	345

第 9 章 信道编码

9.1 信道编码的基本概念	347
9.2 线性分组码	353
9.2.1 基本概念	353
9.2.2 生成矩阵和监督矩阵	354
9.2.3 对偶码	359
9.2.4 系统码的编码与译码	360
9.2.5 汉明码	363
9.3 循环码	363
9.3.1 基本概念	363
9.3.2 多项式描述	365
9.3.3 生成多项式与生成矩阵	368
9.3.4 监督多项式与监督矩阵	372
9.3.5 编码与译码电路	374
9.3.6 编码的加长与缩短	376
9.3.7 循环冗余校验	377
9.4 BCH 码与 RS 码	378
9.5 卷积码	383
9.5.1 卷积码的编码	384
9.5.2 卷积码的译码	390
9.5.3 卷积码的距离特性	396
9.6 交织	397
9.7 级联码	400
9.8 Turbo 码	402
9.9 高效率信道编码 TCM	403
9.10 低密度校验码	408
9.10.1 LDPC 码的译码	409
9.10.2 LDPC 码的编码	411
9.10.3 LDPC 码 H 矩阵的构造	411
习题	411

第 10 章 扩频通信

10.1 引言	416
10.2 伪随机码	416

10.2.1	定义	416
10.2.2	最长线性反馈移存器序列(m 序列)	417
10.2.3	Gold 码	422
10.2.4	正交 Gold 码(偶位)	422
10.2.5	随机序列的实现(样本)	423
10.3	伪码的同步	423
10.3.1	粗同步(捕获)	423
10.3.2	细同步(跟踪)	426
10.4	正交码	428
10.5	直接序列扩频	431
10.5.1	直扩二相移相键控	431
10.5.2	功率谱密度	433
10.5.3	DS-BPSK 的抗干扰性能	434
10.6	直扩正交多进制调制	437
10.7	码分复用与码分多址	438
10.7.1	码分复用	438
10.7.2	沃尔什码相关特性的改善	439
10.7.3	码分多址	440
10.8	多径分集接收:Rake 接收	440
10.9	扩频码的其他应用	441
10.9.1	误码率的测量	441
10.9.2	数字信息序列的扰码与解扰	442
10.9.3	噪声发生器	443
10.9.4	数字通信加密	443
10.9.5	测量时延	443
	习题	444

第 11 章 正交频分复用多载波调制技术

11.1	引言	446
11.2	OFDM 多载波调制技术的基本原理	448
11.2.1	BPSK-OFDM	448
11.2.2	QAM-OFDM	451
11.3	OFDM 调制的数字实现	452
11.4	循环前缀	453
11.4.1	保护间隔	453
11.4.2	循环前缀	454
11.5	OFDM 系统的收发信机	455
11.6	OFDM 系统的峰均比	456
11.7	载波频率偏移对子载波间干扰的影响	457

11.8 OFDM 系统的应用	458
习题	459
第 12 章 通信系统的优化	
12.1 通信系统优化的物理与数学模型	460
12.1.1 模型的建立与描述	460
12.1.2 通信系统优化的度量指标与准则	462
12.2 通信系统单技术指标下的优化	463
12.2.1 无失真信源的编码定理	464
12.2.2 限失真信源的编码定理	464
12.2.3 信道编码定理	465
12.3 基于 AWGN 信道在可靠性指标下的优化	465
12.4 随参信道通信系统在可靠性指标下优化的基本思路	468
第 13 章 通信网的基本知识	
13.1 引言	472
13.2 通信网的组成要素和性能要求	472
13.3 交换技术的基本原理	474
13.3.1 电路转接	475
13.3.2 信息转接	475
13.3.3 多址接入	477
13.4 信令和协议	478
13.4.1 电话信令	479
13.4.2 数据网协议	480
13.5 下一代网络	482
13.5.1 NGN	482
13.5.2 软交换	483
13.5.3 IMS	483
13.6 无线自组织网络	484
13.7 结束语	484
部分习题答案	485
缩略语	496
参考文献	498

第1章 绪论

1.1 引言

通信技术和通信产业是20世纪80年代以来发展最快的领域之一。不论在国际上还是在国内都是如此,只是在层次上和内涵上由于发展水平不同而有所不同。这是人类进入信息社会的重要标志之一。

从社会发展史来看,农业社会以生产物质为主,包括生存所必需的生活资料和生产所必需的生产工具。到了工业社会,为了扩展人的体能而引入的能量生产,形成这一时代的特色。这从蒸汽的热能转化成机械能开始,而后用发电机转化为电能。电能是一种便于使用的能源,它可高效地转化成各种能量供不同的需要,因而极大地促进了物质生产和生活质量,使人类社会发生了一次飞跃,以至列宁曾说:“共产主义就是电气化加苏维埃。”另一次飞跃就是引入扩展人的智能的信息技术,使人类进入一般所说的信息社会。信息是一个古老的概念,但直到20世纪中叶,香农(C. Shannon)在概率论的基础上定义了信息熵,才有了定量的意义。以后由此建立了信息论这一新学科,对于信息技术的发展起到奠基作用。但是这种信息的定义是有特定限制条件的,所以一般称为窄义信息或语法信息。能用于通常意义下的信息或广义信息,迄今尚无确切的科学定义。一般地说,它是从不知到确知的过程中的内涵实体,也可认为信息就是一种知识。信息是一种资源,它不同于物质资源和能量资源,是可以共享和重复使用的,而且可不受空间和时间的限制而广泛地传播。所以它对物质生产和能量生产可起极大的促进作用。关于信息技术,一般认为有三大类:电信技术、计算机技术和三遥(遥测、遥感、遥控)技术。电信技术是克服空间限制的主要手段,几乎可以瞬间把大量信息传送到遥远的各处。计算机技术可以把大量信息存储起来并加以处理,从而克服时间限制,使共享和重复使用成为可能。遥控、遥测和遥感等技术又使信息的提取和利用扩展到更大的范围和更深的层次。这些技术的发展,实际上就是人的智力得到极大的扩展,从而不但使传统产业得到改造而进一步发展,新产业也不断形成,如探索宇宙奥秘的航天产业、丰富人的精神生活和物质生活的家电产业等。其实这些技术都与通信和通信网有关,因此通信技术的发展加快信息社会的形成,而信息社会的形成又加速通信产业的发展。通信原理因而备受重视,几乎成为所有电子专业的必修课程。本书的编写力求满足这类需要,也就是着重基础理

论方面的问题,而对新型和发展中的专业知识则只作适当阐述,以利以后专业课详细讨论。

1.2 通信发展简史和展望

通信就是互通信息。从这个意义上说,通信在远古时代就已存在。人之间的对话是通信,用手势表达情绪也可算通信。后来,用烽火传递战事情况是通信,快马与驿站传送文件当然也是通信。现代的通信一般是指电信,国际上称为远程通信(telecommunication)。1837年,莫尔斯(S. Morse)完善了电报系统,此系统于1844年在华盛顿和巴尔的摩之间试运行。这可认为是电信或远程通信,也是数字通信的开始。1875年,贝尔发明电话,成为模拟通信的先驱。1892年,美国史端乔(A. B. Strowger)又引入步进开关,使电话实现自动化,这些通信方式当时是用电线相互连接来传送信号的,所以距离还不能太远。1864年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立电磁场理论。1887年,赫兹(H. Hertz)实验证明电磁波的存在。1901年,马可尼(G. Marconi)实现了从英国到纽芬兰的跨大西洋无线电信号的接收。这是一次超过2700 km的通信,进一步显示了电信的巨大潜力。1905年,费森登(R. Fessenden)还试通了无线传送语音与音乐。这些实验系统虽然很简陋,但它所具有的诱人前景促进了技术和理论的发展,如可产生和放大高频信号的电子管、调频和外差系统等,陆续相继出现。电报和电话成为电信的主流,以至认为电信就是电报电话,如国际电联有电报电话咨询委员会(CCITT),美国有美国电报电话公司(AT&T)等。这就是20世纪开始一段时期的情况。此时电信虽已在社会和经济发展中起着重要作用,但还处于辅助地位,也就是还未进入信息时代。1948年对电信来说是重要的一年。香农发表著名的论文《通信的数学理论》,提出通信系统的一般模型,它适用于任何形式的电报电话通信,也适用于任何其他通信,包括声音和电视广播、遥控遥测系统等。在深入分析模型后提出信息熵、信道容量等概念,从而定量地揭示了通信的实质问题,引起许多学者的重视。之后香农又发表率失真理论和密码理论等论文,经其他学者的努力,逐步完善了一系列编码定理,到20世纪60年代形成信息论这一新学科,可以认为它是通信系统,或更一般地说是信息系统的基本理论;更具体地说,就是关于信息、信息传输和信息处理的基本理论。所以对通信技术的扩展和发展起了很大的作用。另一方面,1948年勃拉登(W. H. Brattain)等发明了晶体管。以后又发展成集成电路到超大规模集成电路,使在这期间刚出现的数字计算机得到迅猛发展,并很快与通信技术相结合,也就是通信设备日益计算机化,而计算机借助通信日益网络化。这是从技术和器件上促进通信的发展,并降低费用,从而使各种通信被广泛地使用。在这两方面的影响下,电信技术和电信产业向数字化、远程与大容量化、网络与综合化、移动与个人化等方向发展。

数字化可从脉码调制(PCM)说起。1937年里夫提出用脉码调制对语音信号编码;这种方法有许多优点,例如易于加密,不像模拟传输那样有噪声积累等。但在当时代价太大,无法实用化;在第二次世界大战期间,美军曾开发并使用过24路PCM系统,取得优良的保密效果。但在商业应用上,直到20世纪70年代才逐渐取代当时普遍采用的载波系统。我国是在20世纪70年代初期决定采用30路的一次群标准,80年代逐步引入商用,并开始了通信数字化的方向。数字化的另一个动力是计算机通信的发展。随着计算机的能力的扩大,并日益被利用,计算机之间的信息共享成为进一步扩大其效能的必需。20世纪60年代,人

们对此进行了许多研究工作,其成果表现在 1971 年投入使用的阿帕网(APPANET)。这是美国国防部资助建立的,采用了分组交换方式,这又促进了数据通信的发展。于是计算机之间的通信从局域网向广域网发展,以至因特网。90 年代因特网的用户飞跃性增加,业务不断扩大,甚至传统的电话业务也能以低价在因特网上传送。在这期间还有移动通信领域中的 GSM 系统的引入。它是一种时分多址接入的数字通信系统,正在逐步替代原来广泛使用的模拟调频方式。由此可见,通信系统中的信息传输已基本数字化。在广播系统中当前还是以模拟方式为主,但数字化的趋向也已明显,为了改进质量,数字声频广播和数字电视广播都已提到日程上来,预计 21 世纪初会逐步替代现有的模拟系统。尤为甚者,设备的数字化更是日新月异。近年来提出的软件无线电技术,试图在射频进行模数(A/D)变换,把调制解调和锁相等模拟运算全部数字化,这将使设备超小型化并具有多种功能。所以数字化的进程还在发展。

远程和大容量化是另一个发展趋向。最早的电报通信的信息量很小,曾用单线回路。电话出现后,采用双线以增大容量和改进质量,传输距离也可远些。这种明线持续了一段时间,技术上不断有所改进,例如用交叉、平衡、频分复用等技术来改进传输质量和扩大传输容量。但随着通信需求的增加,尚需更大容量的传输信道。1941 年美国建成第一条同轴电缆,最初开通 480 路电话,以后的同轴电缆电路陆续增加到 13 200 路。我国在 1976 年敷设京沪杭 1 800 路同轴电缆并投入使用。这些电路仍采用频分复用的载波技术。到 1966 年,英籍华人高锟(C. Kao)提出用玻璃光纤传送信号,损耗可低于 20 dB/km。这种方式具有大容量的前景,而且可解除铜资源不足的困难,所以吸引许多学者去研究,光纤通信就此迅猛发展,从多模到单模,从单波到波分复用;每条光纤已可传送 10 Tbit/s 以上,损耗低于 0.1 dB/km,为大容量通信创造条件,也进一步促进了通信的数字化。随着激光器寿命的提高,越洋敷设大容量光缆也已成现实。当前采用 SDH 体系的光缆网已成为世界性远程通信骨干网的主要构成部分。

在无线通信方面,原来寄希望于短波来达到远程通信,但在这类频段上,容量不可能大,而且通信质量也不好,甚至不能保证 24 小时通信不中断。第二次世界大战以后,发展重点转到微波通信。微波是指波长在 1 m 到 100 μ m 之间的电磁波。这类电磁波的频率很高,可用来传送大量信息;但不能从电离层反射,可传输的距离较近,为了能进行远距离传送,可采用接力的方式。这就是每隔 50 km 左右设一中继站,把前一站来的信号放大并变频,再向下一站传去。一连串中继站就构成了地面微波接力通信系统。这种系统从 20 世纪 60 年代起得到广泛的应用和很大的发展,因为它与同轴电缆相比,建设费用较低而建设时间较短,其通信容量从 300 路发展到 6 000 路,从模拟系统发展到数字系统。但它不宜用于跨大洋作业,所以通过人造卫星的微波通信应运而生。1945 年克拉克(A. C. Clarke)发表“地球外的中继”一文提出卫星通信的设想,以后经许多实验,包括无源的“回声一号”、低轨道的“中继一号”、准静止的“同步二号”等,1965 年美国发射静止卫星“晨鸟”,用于欧美间的商业通信,卫星通信开始进入实用阶段。卫星通信的远程性是显著的,而且静止卫星所中转的信号是稳定的,通信质量良好,其技术的发展目标主要是增大通信容量和降低成本。1965 年所发射的第一代国际通信卫星(INTELSAT)的容量只有 240 路双向话路,设计寿命只有 1.5 年;到 1992 年发射的第五代 II 型国际通信卫星的容量已达到 18 000 路外加 3 路电视节目,寿命为 15 年。这是通过增多转发器、扩展频段、采用成形天线和极化分离等手段来达到

增容的。增容使卫星通信的费用不断下降,在 2 000 km 以上的通信线路中,一般情况下,静止卫星线路的费用是最低的,所以它在 20 世纪 80 年代发展很快。许多国土面积较大的国家的国内通信也采用它。但它与光缆通信相比还有所不足,当前赤道上空的位置,差不多已被占用殆尽,必须开辟更高的频段,或用中低轨道的非静止卫星,后者往往用于移动通信,这将在以后讨论。

最早的通信都是点对点的通信,也就是每一对用户之间建立一条线路。随着用户数的增加,而且要两两之间都能相互通信,就须引入转接机制或交换功能,以节省线路费用。最初是用塞绳进行人工转接,1892 年美国史端乔(A. B. Strowger)发明了步进制自动电话交换机,开始了自动拨号的进程。1919 年瑞典帕尔姆伦(N. Palmgren)和贝塔兰德(G. A. Betolander)提出纵横接线制,并于 1926 年开通使用。随着半导体技术的发展,出现过半电子电话交换机和准电子交换机,到 1965 年,美国研制生产 ESS1 程控空分交换机,1970 年法国开通了 E-10 程控数字交换机,把计算机技术引入交换设备,从此开始了高性能、高可靠的交换技术,形成公用交换电话网(PSTN),其规模日益扩大,逐步成为最大的世界性通信网。同时,根据业务的性质,还形成各类业务网,如电报网、传真网、电视转播网等。这些通信网都采用电路转接方式,也就是用户间一旦接通,这电路就被占用,直到通信完毕。另一种转接方式是信息转接,或称存储前发,适用于非实时的数据信息。当计算机数量增多时,就需能互通信息以达到资源共享,提高计算机的功能。这样就出现了信息转接的分组交换网,其重要标志是前面已提出的阿帕网。以后又发展到世界性的因特网。这些网在传输信道上虽可共用一条电缆或光缆,但从端到端的接通和运作方面各有自己的规范,因此其网络资源不能互通有无,终端设备是各自独立的。所以在 1980 年日本电报电话公司(NTT)提出综合业务数字网(ISDN)的结构,试图用现有的用户线同时传送数据和语音。这种技术在研制和开发取得成功,在欧洲有较大发展。综合业务数字网虽有诱人的前景,但由于市场等原因,未能如预期那样发展,可认为是网络和综合化进程的阶段性工作。到 20 世纪 90 年代末提出三网(电话网、电视网和因特网)融合,试图用 TCP/IP 技术把语音和图像信息以数据包形式统一在网内传送;在终端方面,以多媒体技术为基础来综合各类信号;这样就可提高传输效率,节约发展投资。要实现这类方案,还有很多技术问题和部门间关系的问题必须解决,研发工作成果也常有报导,可认为是当前网络和综合化趋向的表现。

现在来简述移动和个人化的发展简史。最早的移动通信可追溯到 19 世纪末船舶上用短波进行电报通信。从 20 世纪 20 年代起,船舶上可通无线电话,在陆地上的警车中也装有无线电台作调度通信。到 40 年代,欧美各国开始建立公用汽车电话网,使通信的移动化进入一个新阶段,之后发展成可大范围漫游的蜂窝移动电话系统。70 年代美国开始使用无绳电话系统。80 年代发展成数字无绳电话系统,如英国的 CT2、北美的 CT2+,瑞典的 CT3 等,有的可提供越区切换。蜂窝移动电话系统也实现数字化以提高无线频谱利用率,从而可扩大用户数。90 年代初,西欧各国相继开通采用时分多址(TDMA)的 GSM 系统,美国还开发了码分多址(CDMA)的 IS-95 系统。最近又在发展宽带多媒体的第三代蜂窝移动通信系统。这类系统有三种国际标准:TD-CDMA、WCDMA 和 CDMA 2000,其中 TD-SCDMA 是我国提出的,正在积极推进。目前,所用手机越做越小,充分发挥移动性的优点,因此有些系统被称为个人通信系统。其实个人通信一般理解为任何人在任何时间任何地点可与任何对象(人或计算机)互通任何信息。这五个“任何”在英文中都以 W 为第一字母,所以个人通信