

高等学校电子信息类系列教材

# 通信系统原理

冯玉珉 编著

张树京 主审

清华大学出版社

北方交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书是根据通信专业教学大纲,在张树京教授 1992 年主编的《通信系统原理》(第 2 版)基础上重新编写的。全书共分 10 章,从通信系统角度,重点讨论“信息、调制、传输与噪声”,加强数字通信原理,并增加了无线扩频调制和通信网的发展进程等内容。教材编写突出了“概念—思路—重点—方法—应用”,可读性强。

本书可作为通信工程专业教材,同时适用于从事通信、信息工作的科技人员自学及其他相关专业的教学。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理/冯玉珉编著.—北京:北方交通大学出版社,2003.6  
(高等学校电子信息类系列教材)

ISBN 7-81082-111-3

.通... .冯... .通信系统 - 高等学校 - 教材 . TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 006774 号

责任编辑:郭 洁 特邀编辑:高本辉 崔素言

印刷者:北京东光印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 邮编:100044 电话:010 - 51686045,62237564

清华大学出版社 邮编:100084

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:24.75 字数:610千字

版 次:2003年6月第1版 2003年8月第2次印刷

印 数:3 001~8 000册 定价:33.00元

# 前 言

作者曾于 1989 年随同主编张树京教授参与编写了 1992 年出版的《通信系统原理》教材,同时主编了配套的习题集。10 多年来,通信技术已有了很大的发展,对本课程教学提出了新的要求,作者在 20 多年的教学实践和与同行的不断交流中也有不少新的认识,编写一本当前更为适用的教材早已是作者的心愿。

本书以“阐明概念、思路清晰、重点突出、分析透彻、结合应用”为基本着眼点,对已有教材的篇章设置与内容进行了较大篇幅的增删与调整,但仍从系统角度重点讨论“信息、调制、传输和噪声”及其有机的联系,并力图建立统一的分析方法。期望使读者能从本教材中,对通信系统的本质和主要技术原理有一个系统而准确的认知。

本书共分 10 章,考虑到数字通信与无线通信和通信网的快速发展,在第 1 章增加了无线传输特点的梗概介绍,并对现代通信系统的主要环节给予了概要描述;压缩了确知信号分析和模拟调制篇幅,简化了传统的数字编码内容,加强了现代数字通信部分,并增加了扩频调制,且对通信网发展进程进行了较为全面的描述。

在本书编写过程中,由于充分考虑到“概念—思路—重点—方法—应用”五个环节,因此可读性强,尤其适于自学。作者认为,在教学中约有 2/3 篇幅可由学生自学,由教师进行导读。因此,本书各章均设有多个例题和有一定特色的小结,以及难易适度的习题,这些均有助于使读者透彻理解教材内容。为了满足不同读者的要求,本书分出两个层次,高层次的章节以“\*”标出。

1992 年出版的配套习题集,受到广大读者的欢迎。本书出版之后,还将出版习题集修订本,以及适于考研的参考书目。

在本书的编写过程中,我的老师张树京教授给予了悉心的指导,并担任了主审,这里深表谢意。与作者多年来共同从事本课程教学的齐立心教授,张星、郭宇春副教授等对本书出版给予了很大的支持。在成稿过程中,研究生徐红艳、尉明明等承担了全部文字录入、制图和校核工作,这里一并致谢。

由于作者水平有限,本书必会多有遗漏与错误,敬请同仁与读者批评指正。

作 者

2003 年 2 月

## 第 1 章 通信系统概述

本书首先以通信系统概述形式,简单介绍信息、调制、传输与噪声这四大部分所涉及的基

本概念、系统构成及各部分功能、通信质量和频段划分等,以便在系统学习各章节之前,对本书有一个大体了解。

## 1.1 信息与信息技术

### 1.1.1 信息

自 20 世纪中叶发明了第一台计算机开始,标志着人类社会进入了信息时代或信息社会,至今已走过了近 60 年的发展历程。当今,以计算机与通信紧密结合为特征的信息业,已与能源、材料成为社会发展与人类生活的三大支柱产业。信息正在被千家万户所接触、所利用、所认识,并且日益深入到社会的生产、科学研究、文化与生活及管理所有领域,对人类社会的发展、物质与精神文明带来极大的推动作用。

什么是信息?若从它的广泛内涵和应用所体现的大量侧面来看,可以派生出几十个“定义”。一个带有哲理性、较为本质的信息定义为:信息是事物运动的状态和方式。

世界充满着事物,事物的运动是绝对的,静止是相对的,而运动的事物必有其一定的状态和固有的运动方式。因此,信息具有特殊性、普遍性、广泛性,以及它的实效性与时效性。信息又分为三个层次。

(1) 语法信息:信息表现方式的状态、逻辑结构。事物运动体现的信息是客观存在的,所有人都可以以适当形式感受到。如一幅画面、一篇文章或一屏编码符号,人人都可以看到其呈现的全部形式。

(2) 语义信息:表示事物状态或逻辑形式所具有的内涵、信息内容的理解。于是只能有一定认知能力或理解力的人才懂得它的内在含义,如文字的含义、编程代码表示的信息内容不是任何人都能透彻理解的。

(3) 语用信息:这是更深层的信息含义,即不但懂得其含义,而且了解它的效用,如何利用。如研究开发人员必然充分了解他所涉及的信息结构、内涵、应用目标,并有能力去开发应用,或操作运用,达到信息施效目标。

由上述关于三个层次的信息概念,可以说,对信息的认识与利用是无量量的。

### 1.1.2 信息技术

信息技术是获得、处理和利用信息的手段或方法的统称。由此,信息技术分为三类。

(1) 信息感测技术(transducing & measurement):实现信息的采集和测量的技术。通常针对不同的信息存在形式,利用相应的传感器件,获得便于处理与应用的电或光信号或数据形式。从信息论的观点,信息可以量度。就二进制数据来说,1,0 码各是一个单位的信息量,用“比特”(bit)表示,可表示一个独立的信息含义,如可与否、晴天或阴天。

(2) 信息加工技术(Manipulation):包括基于计算机的加工处理和信息传输(通信)技术。这一技术的广泛性、快速发展及巨大作用无法言表,两者越来越多、更为紧密地结合——C & C (Computer & Communication)——已是新信息产业的主导技术。

(3) 信息施效技术(Effectuation):对于信息感测加工的根本目标在于信息的利用。如:显示、指示、判决、调整、优化、决策、监视、控制、检测、识别、翻译及诊断等,具有极为广泛的利用

价值。

### 1.1.3 媒体与多媒体

人们所说的信息,总是以某种形式表现或表示出来,因此称为信息媒体。信息媒体可粗分为两类。

(1) 感觉媒体(perception media):是由人的五官功能直接感知信息的表现形式,如视像(video)、声音(sound)、文字、图形(graphics)、符号、代码等。

(2) 表示媒体(Representation):从信息技术角度,为了获取、加工处理和存取及应用的需要,将多种信息媒体利用适当规定的信号方式、编码格式或数据结构进行表示,并且根据不同的应用与质量要求,可以将这些表示媒体通过存储或传输而恢复为原来的感觉媒体。

至于多媒体,是近 10 年来才开始发展起来的新的信息业。所谓多媒体(Multimedia),主要是指以声音、图像为主的各种表示媒体的有机结合或融合。具体说,多媒体信息技术是同时采集、处理或存储、交换(exchanging)、传输和显示(presentation)至少两种不同类型的信息媒体(如多媒体计算机, MPC),并且其中有一两个主媒体,即声音或图像。多媒体通信应当是在一次呼叫(通话状态)中能同时传送与同步接收、显示至少两种不同类型信息媒体的交互业务,如 VOD、会议电视等。

通信的发展已进入多媒体时代,随着计算机处理能力与通信网的宽带化、个人化进程,多媒体将为人类随时、实时地提供最真实、最全面的、由用户任选与互操作的丰富信息内容。

## 1.2 通信与通信系统

通信技术是信息技术的一个重要子类,虽然信息工程具有宽泛的覆盖面,且现代信息处理与存储等技术越发精湛,但通信业的崛起却具有更大的社会意义和效益。

### 1.2.1 通信

通信的含义无论从中文“通信”(或“通讯”)或英文 Communication 来看,名词本身就在很大程度上体现了通信的定义或含义。汉字“信”或“讯”含有“言”与“人”,合成的含义为“公众对话”,“通”是由“甬”道传输,这就明确地表明以电话为传统的“通信”,是信息从一个地方通过传输信道传送到另一个地方的对话过程。

这里拟为现代通信给出一个完善而简洁的定义:通信是信息或其表示方式(表示媒体)的时空转移。

这一定义远远超出了对话的业务范围,同时在通信过程中,除了有很小的传输延时外,尚需要进行处理、转发,也会发生一定的时延,以及可能缓存、显示或存储再现。因此,这一定义不但包括了空间,也包括时间在内的信息转移。

### 1.2.2 通信系统

通信系统具有很广泛的内涵,并有多层次。一般地,利用传输信道或通信网,将具有收、发信息功能的终端设备由信道或链路有机连接(永久或暂时的)起来,这些实施信息传输的设备集合,称为通信系统。图 1-1 示出了一个通信系统的基本构成框图,同时也包括点与点间、

点与多点间,以及多点之间的信息传输系统所涉及功能单元的有机结合。

图 1-1 通信系统基本组成框图

通信系统按工作方式分,可分为单工(Simplex)、半双工(Half-duplex)和全双工(Duplex)。这三种方式的例子如单向广播、步话机和固定电话与移动电话等。

通信系统的构成根据通信业务特征、信道类型、传输方式等可有多种类型。模拟系统已成为传统技术,数字通信系统在终端要涉及很多信号处理与变换设备,计算机数据通信又提供了一套特殊的标准接口,传输、控制……一系列协议,多媒体通信系统涉及多种媒体集成、同步与交互功能等,更为复杂。

一个基本通信系统包括的设备环节是发送设备、接收设备与传输信道和传输设备,可实现单向/双向或单/双工通信功能。图 1-2 示出了一个较为完善的数字通信系统。它的发送与接收端各包括 9 个功能单元,还有传输信道及收发同步系统等。

图 1-2 数字通信系统框图

现分别介绍各部分的功能与作用。

### 1. 源信息格式(format)

源信息格式是信息采集后的源信息最初表示方式,如模拟电信号的限带波形,图像信号的扫描像素集合或其红绿蓝三个基本分量的PCM编码。信源格式为信源编码做好了基本格式的准备,其中还包括信源编码前去噪、限带等的预处理。

### 2. 信源编码

为了提高信息的有效性,在源信息中可能存在某种程度的冗余“信息”及根据需要的质量标准,可以去除其中次要信息,因此提高有效性的措施为采用去相关及压缩编码,即用更少的编码位数来表示符合一定接收质量的更多源符号,其基本理论是香农率失真理论,其基本技术如无失真预测编码和有损正交变换编码等。对于多媒体通信中的视频图像编码,因其具有更大冗余度和视觉特性的掩盖效应,可以提供名目繁多的压缩技术,有损压缩往往可达到几十倍、上百倍以上的压缩倍数。总之,信源编码是按一定精度、为信息提供一种编码格式或数据结构的,即构成有效的“表示媒体”形式。

### 3. 信道编码

经过信源编码的码字序列,均应认为是重要信息,因此如果在传输与接收判决中发生错误或超出限定的符号误差概率,则会不满足接收者的质量要求。如果信源码字之间互为正交或不相关,则有一定的抗干扰能力,或者基带码流的码符号选用某些合适的码型,也有一定抗干扰性。最好的方法是根据信道环境的特性,将信源码字中按一定规则适当加入冗余码元(监督元),构成差错控制码,可以根据不同的结构和冗余位多少,提供1位或多位自动纠错或通过反馈重发纠错能力。对于信道带宽无限制而传送信号功率受限(如卫星)的通信系统,在保持所需的误差率时,利用差错控制编码能降低所需的信号功率或信噪比。

### 4. 信道复用

信道复用(Multiplexing)是通信系统中很重要的组成部分。其基本功能是使多种信息流共享同一信道,提高通信资源利用率。如目前无线正在使用整个频段跨越 $10^5 \sim 10^{12}$  Hz的频率资源,各个不同频段和频点用于各种类型的无线信号传输,必须采用频分复用(FDM)。基于有线信道的基带传输,多采用时分复用(TDM)。还有基于特殊媒体分离和空间分离的空分复用(SDM),现代无线扩频通信的码分复用(CDM),以及水平和垂直极化的电磁波传输提供极化复用(PDM)。近几年的发展已大量推广利用光密集波分复用(DWDM),可以使一条光纤容纳几亿个数字电话的点对点间传输。

无线和移动通信采用的复用方式为“多址”(Multi-access),计有频分多址(FDMA),时分多址(TDMA)、空分多址(SDMA)和码分多址(CDMA),以及可用双极化频率重用的极分多址(PDMA)。

各种复用/多址,在基本原理上的共同点是复用信号集的各信号间或多址系统各用户地址码之间是正交关系。空分复用/多址,即SDM/SDMA是由物理通道隔离来保证这种正交关系的。

### 5. 调制

调制是信号的一种变换过程,通常是将不便于信道直接传输的基带模拟信号或编码符号序列,或其波形序列作为调制信号,去控制一个适于信道传输性能的“载波”,使其某一两个参量正比地受控于调制信号。

载波为正弦信号时的调制方式称为连续波调制。此时若调制信号为模拟信号,可提供模拟(线性)调幅和模拟调角(又分调频与调相);若调制信号为数字代码,相应的调制方式分为数字调幅、调频、调相,均称为数字信号的载波传输或频带传输,仍为模拟传输方式。

基带数字信号作调制信号时,宜以脉冲序列作为载波,通称为脉冲编码调制(如 PCM 数字电话)。

调制是实现复用的重要环节,同时多元调制可提高信道频带利用率,不同的调制方式的抗干扰性能也不同。调制系统的信号性能尚与调制信号的设计有关,并且接收与判决的方式也影响接收质量。本书第 3、4、6 章及第 7 章将重点介绍各种调制方式,并包括基本理论与各个调制系统的技术特点与性能分析。

## 6. 扩频

扩频(SS)是一种特殊的现代无线通信调制技术。就数字扩频系统来说,可以把周期很长、码元(称为码片, Chip)持续时间  $T_c$  远小于信息码之间间隔  $T_b$  的伪噪声码(PN)序列作为“载波”,于是载荷信息的 PN 码带宽较信息码展宽几十倍到上万倍。由扩频实现的码分复用或多址构成的无线移动通信系统,各用户采用不同的互为正交的 PN 序列作为地址码,可使大量用户正交复用数兆赫以上的扩频带宽,且具有极强的抗各类干扰的能力。本书第 7 章将简单介绍扩频调制原理,而传统的通信系统原理教材一般不设此章节。

## 7. 同步

在数字信号传输和采用相干接收或最佳接收方式的模拟调制系统中,尚有一个非常重要的控制单元,即同步系统。它可以使通信系统的收、发两端或整个通信网络,以精度很高的时钟提供定时,以便系统、网络的数据流能与发信端同步地、有序而准确地接收与恢复原信息。同步准确性对通信质量有很大影响。多媒体信息传输对同步有更进一步的要求,应达到各信息媒体之间的同步显示。由于本书未单设篇章讨论同步系统原理,这里拟加以概括介绍。

从功能和实现环境的方法不同,同步可分为四种方式。

### 1) 载波同步

在数字或模拟调制系统中,为了以相干或相关解调方式准确恢复原信息,接收端提供的“本地载波”或称“相干载波”应与接收到的已调制载波严格同频、同相。

### 2) 码元或位同步

典型应用诸如数字信号基带与频带传输系统,以一定码型的脉冲编码波形序列,直接进入基带信道传输,收发两端的位定时系统,可以确保系统有一致的时钟,以便有序、准确地对失真的接收波形进行定时抽样,而正确判决原发送信息。图 1-2 所示的全部数字单元都必须采用同一时钟同步。

### 3) 帧同步

数字、数据信号传输,往往要按一定规则划分为一定规模的分组数据块(数据报),可称其为信息帧。如一个经过压缩编码的静止画面,由多个图块构成的信息分组也为 1 帧,还可将一个画面作为 1 帧。不论帧的大小,均在发送前加有帧头与帧尾的额外开销,以便转发或接收时正确认定逐个帧的完整性和帧序。如数字电话——PCM 基群共有 32 个时隙,每时隙 1 个样本编 8 bit 码字,共 256 bit,计为 1 帧,应加入帧定位字,并且每 16 帧又构成 1 个复帧,又加入复帧定位字,以便逐帧地顺序接收各用户编码信息。

#### 4) 网同步

在目前通信网发达的时代,很多通信系统是通过网络功能构成的。地区网或全国网必须设有网同步,据网络的类型或要求不同,网络同步的定时时钟可取自国际 1 级时钟或地方时钟。实现同步的方法很多,这里不作具体介绍。同步系统可看做通信网正常运行的中枢神经系统。

### 1.3 信道和噪声

各种发送信息欲传送到既定的信宿(Destination),可选用适于传输的物理媒体,完成通信功能,这些连接发信与收信设备而适于不同类型通信业务的各种物理媒体通称为信道。

#### 1.3.1 信道分类

信道可分为有界与无界两大类,即通常所说的有线信道和无线信道。前者如双绞线、电缆、光纤、波导等,后者为自由空间提供的各种频段或波长的电磁波传播通道。

根据各种信道不同的特征和参量及其变化情况,又将它们分为恒参信道和随参(变参)信道。前者如有线信道、微波与卫星信道等,后者如无线系统的短波和超短波(300 MHz ~ 3 GHz)散射信道。

一般地,若单指传输媒体而言称为狭义信道。在具体通信系统构成中,往往把信源发出的模拟信号和数字编码基带信号视为信息部分,从调制器到接收端解调这一中间变换历程中,经过了包括物理媒体在内的线路设备(如交换、放大、中继等中间件)传输路径,因此将图 1-3 所示的调制信道与编码信道称为广义信道。

图 1-3 调制信道和编码信道的定义

将信道分类归纳为表 1-1 所示。

从分析信道的特征角度,又可将上表所提到各类不同层次的信道,大体分为三种特征:

- (1) 线性与非线性信道特征;
- (2) 时不变与时变信道特征;
- (3) 带宽或功率受限信道特征。

另外,各种无线通信均利用自由空间传播电磁波。若从理想而言,自由空间是

表 1-1 信道分类

信道	狭义信道	有线(有界)信道——如明线、电缆、光纤等	
		无线(无界)信道——如短波、微波等	
	广义信道	调制信道	恒参信道
			随参信道
编码信道	编码信道	无记忆	
		有记忆	

无吸收、无反射效应的,但实际上地球周围的不同地区环境和不同高度,却由于地表环境和大气及其变化的影响,对不同频段无线通信产生不同影响。因此,针对不同无线频段的信道又有各自比较复杂的特性(本章后面将提到)。

### \* 1.3.2 恒参与变参信道特征

#### 1. 恒参信道特征

恒参信道以有线信道为最典型,其特征参量主要是频率特征,如幅度频率特性与相位频率特性及频率漂移等。反映在时域,如信道时延、抖动,尚有电平波动和非线性等。其中,幅度频率特性,就理想而言,可表示为理想传递函数

$$H(\omega) = K e^{-j\omega t_d} \quad (1-1)$$

其中,  $K$  为衰减或增益因子。实际上不是理想的,即  $K$  一般在频带内不为常数,低频端与高频端将有更大衰减,应用中常取 3 dB 带宽。此时非理想特性是式(1-1)中  $K$  与  $t_d$  均随频率而变化,即

$$H(\omega) = K(\omega) e^{-j\omega t_d(\omega)} \quad (1-2)$$

当 PSTN 电话线通过 Modem 进行数据传输时,一般在 300 ~ 3 400 Hz 带内,利用 600 ~ 3 000 Hz 进行数据传输,这一段频响特性较为平坦。

$t_d$  为线性时延,当传输一个信号波形时,波形整体延迟  $t_d$ ,相位移则为线性的,即

$$\phi(\omega) = -\omega t_d \quad (1-3)$$

它与  $t_d$  的关系为微分形式,即

$$t_d(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (1-4)$$

但是由于信道可能为非线性,因此  $t_d$  随频率变化(增加),而相移  $\phi(\omega)$  呈非线性,会导致信号波形失真。这种相位失真对声音来说不太敏感,但对数据传输来说,非线性延时或抖动致使数据波形间互相串扰,使接收可能导致差错。

#### 2. 变参信道

变参或随参信道的特性比恒参信道复杂得多。由于地面以上不同高度大气的电离层浓度不同,并随机湍流性变化,对短波传播具有反射作用,对超短波具有对流层散射作用。这种随机性变化参量的信道特征,不能再由式(1-2)表示,即  $K$  与  $t_d$  同时随频率与开机运行后的持续时间(称为 Age)而变化,即信道特征为

$$H(\omega, t) = K(\omega, t) e^{-j\omega t_d(\omega, t)} \quad (1-5)$$

信道系统的冲激响应也由  $h(t)$  变为  $h(t, \tau)$ ,于是信道对于信号  $X_i(t)$  的响应  $X_o(t)$  为

$$X_o(t) = X_i(t) * h(t, \tau) + n_i(t) \quad (1-6)$$

式中,  $n_i(t)$ ——信道加性噪声和干扰。

式(1-6)可以再写为

$$X_o(t) = K(t) X_i(t) + n_i(t) \quad (1-7)$$

表明式(1-6)的卷积项  $X_i(t) * h(t, \tau) = K(t) X_i(t)$ , 这相当于信号介入了乘性(随机变化)干扰。于是当传输已调波为模拟信号时, 对已调信号包络产生不规则模拟干扰, 而对数字信号已调波因乘性干扰的波形失真及码符号波形间相互拖尾干扰, 会导致较大的接收错码率。

乘性干扰的现象表现为各种类型的衰落, 这里由于大气中电离层的电子与离子浓度随年份、季节、昼夜, 以及高度不同随机变化很大, 时间也很长, 于是使通过短波信道后而反射回地面的信号强度也随之而变化。由实测统计表明, 短波信道的这种衰落深度达几十分贝, 衰落周期可长达数十秒, 严重时中断通信。因此, 接收机必须设有很大控制深度的自动增益控制系统, 以便在衰落情况下能较稳定地接收信号。衰落可分为以下三种情况。

### 1) 慢衰落

它是上述由电离层随机变化引起的衰落。

### 2) 快衰落

它是由于短波信道的多径效应引起的衰落, 对信号的影响更为严重。由于发射电磁波束传播到不同的电离层, 反射后到地面构成不同的信号路径而至接收天线(单跳), 也可能是地面反射回电离层经两次反射后到达接收天线(双跳), 如图 1-4 所示。

图 1-4 产生多径效应的机理

在接收端获得的信号是单、双跳及不同路径信号之和, 即

$$R_x(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos[\omega_0 t - t_{di}] = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_i(t)] \quad (1-8)$$

式中,  $a_i(t)$ ——总计为  $n$  条路径中第  $i$  条路径到达的已调波信号的幅度;

$t_{di}$ ——第  $i$  个信号的延迟量;

$\varphi_i(t)$ ——相应于  $t_{di}$  的第  $i$  个信号的相位, 且有

$$\varphi_i(t) = -\omega_0 t_{di} \quad (1-9)$$

由于  $a_i$  与  $\varphi_i(t)$  的随机变化较已调载波变化频率  $\omega_0$  慢得多, 因此式(1-8)可近似为

$$R_x(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i(t) \cos \omega_0 t - \sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i(t) \sin \omega_0 t \quad (1-10)$$

其中, 设

$$\text{同相分量} \quad a_1(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i(t) \quad (1-11)$$

$$\text{正交分量} \quad a_0(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i(t) \quad (1-12)$$

则式(1-10)又可表示为

$$R_x(t) = a_1(t)\cos \omega_0 t - a_0(t)\sin \omega_0 t = a(t)\cos[\omega_0 t + \theta(t)] \quad (1-13)$$

其中,多径合成信号的包络为

$$a(t) = \sqrt{a_1^2(t) + a_0^2(t)} \quad (1-14)$$

多径合成信号的相位为

$$\theta(t) = \arctan \frac{a_0(t)}{a_1(t)} \quad (1-15)$$

这里,  $a_1(t)$  及  $\theta_1(t)$ 、 $a_0(t)$  及  $\theta_0(t)$ , 以及  $a(t)$  与  $\theta(t)$  均为随机过程, 本书第 2 章将具体讨论它们的统计特征。

式(1-13)表明,多径合成的接收信号是一个随机幅度  $a(t)$  与随机相位  $\theta(t)$  的调幅 - 调相波。其中,随机包络  $a(t)$  的变化与电离层反射的衰落相类似,只是它的变化更快,因此常称多径效应引起的衰落为“快衰落”。为了减少接收失真,解决的办法可以采用“分集接收”,即分别接收各主要路径不同到达时刻的信号,然后经各自不同延时调整后,再合成进行提取信号。

以上结果式(1-13)是发送信号假定为等幅载波  $c(t) = A\cos \omega_0 t$  经过多径效应后形成的,显然它的频率成分不再为单一载频  $\omega_0$ ,尚且产生了其上下边带包含的无数频率分量,这相当于信道非线性的频率色散效应,这是随参信道的突出特点。

### 3) 选择性衰落

由于多径衰落导致的幅度随机性起伏衰减,相位随机性变化,还会出现另外一种特殊现象,即频率选择性衰落。

现假定发射信号的傅里叶变换对为  $f(t) \leftrightarrow F(\omega)$ ,经传输衰落后,作为一种简单情况,假定为幅度相等而两条路径到达接收机的多径合成信号,延时分别为  $t_0$  和  $t_0 + \tau$ ,则接收合成信号为

$$R_x(t) = Kf(t - t_0) + Kf(t - t_0 - \tau) \quad (1-16)$$

其相应接收频谱为

$$R_x(\omega) = KF(\omega)e^{-j\omega t_0}(1 + e^{-j\omega\tau}) \quad (1-17)$$

于是,该二径信道传递函数为

$$H(\omega) = Ke^{-j\omega t_0}(1 + e^{-j\omega\tau}) \quad (1-18)$$

且

$$|H(\omega)| = |1 + e^{-j\omega\tau}| = 2K \left| \cos \frac{\omega\tau}{2} \right| \quad (1-19)$$

式(1-19)传递函数曲线如图 1-5 所示,它表明接收信号具有频域周期性深衰落特征,且在  $\frac{2n-1}{2}\pi$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) 各频点信号衰减到零。因此,接收信号质量极差,甚至接收不到这些频率分量信号。一般地由于多径及其延迟  $\tau$  总在随机变化,因此这些无限衰减也

图 1-5 选择性衰落特性

不会总选在一些固定频率值。假定能使信号带宽限制在 2 以内,则将缓解这种恶化情况。

### 1.3.3 信道的干扰

除了上述因狭义信道本身特征影响通信质量外,信道内尚可能受到外部干扰和广义信道中各种设备带来的内部噪声干扰。

信道内干扰源很多,并有多种形式,大体归纳为以下四类。

(1) 无线电干扰:来自各种无线发射机。其特点是频率范围宽,几乎覆盖全部使用频段。但对于特定电台的频率一般是固定的,因此可以进行防护。另外,由于无线电频率管理较为完善,可以将此种干扰限制在最小限度。

(2) 工业干扰:来源于各种电气设备,如电机、电力线、电源开关、电点火(如汽车点火)装置等。此类干扰一般在较低频率范围,如汽车点火干扰在几十兆赫范围内。采用屏蔽与考究的滤波措施,在很大程度上可避开工业干扰。

(3) 天电干扰:来自于雷电、磁暴、太阳黑子及宇宙射线等,它们与季节、气候变化关系较大。不同地区也有很大不同,如赤道附近及两极地区严重。太阳黑子发生变动(约 11 年一个周期)的年份,天电干扰加大,有时长时间中断短波通信。

(4) 内部干扰:来自信道内部各种电子器件,如电阻、天线及传输线等。在这些电子设备中的分子或电子的随机热运动,形成所谓起伏噪声,对于通信信号产生加性干扰。在第 2 章将详细介绍它的机理与影响。本书涉及的各类通信系统,主要是这种噪声,称为热噪声,从机理上它是高斯型统计特征,是通信系统干扰的重要因素。

### 1.3.4 几种常用信道特征

通信常用的信道类型主要有四类。

#### 1. 电话信道

电话信道一般是指庞大的公用交换电话网(PSTN)所提供的基于传统模拟电话或低速数据传输的信道。通信信道的构成多半通过用户终端到本地交换机(节点),再到另一个用户建立的呼叫链路,一旦通话(即呼叫)结束,便及时拆断该链路。电话信道一般属于限带为 300 ~ 3 400 Hz 的线性系统。当用于数据传输时,需在用户端均加入调制解调器(Modem),并利用 600 ~ 3 000 Hz 频响较平坦的频段传输已调波。目前,从用户到节点(交换机)的用户线,可以增设宽带 Modem(如 ADSL),可在数公里内通信带宽扩展到 2 ~ 6 MHz,支持宽带上网和多媒体业务。

近几年 PSTN 已更新为数字化网络,在网上的各交换节点间中继全部数字化传输。通过用户线以 2B + D 或更高速率,可传输话音与综合业务。

#### 2. 光纤

光纤是将电信号变为光信号(电/光转换)后进行光信号传输的物理媒体。光缆是由包层覆盖光纤芯线而构成。光信号是以电磁场形式在光纤芯中传播。光纤自 20 世纪 70 年代投用后,很快显示出很多突出的优点,诸如,它带宽极宽( $2 \times 10^{14}$  Hz 以上),通过目前可达到的技术——密集波分复用(DWDM),一条光纤中可以支持 1 600 Gbit/s 的传输速率;实验表明,基于单波 160 Gbit/s 速率的 1 024 个波,可达约 160 Tbit/s 的点到点传输流量(1 Tbit/s =  $10^{12}$  bit/s);光纤传输损耗极低,小于 0.2 dB/km,不受电磁干扰,重量极轻(一条光纤芯 27 g/km),

抗弯曲,耐湿热和腐蚀,敷设方便、灵活,可架设到电杆上。光纤价格极低,目前国内的生产供大于求。

光纤是发展宽带网的主力军,目前正在大力研究全光网,传输过程无需电/光与光/电转换,并进行全光交换,从理论上讲,光纤可为通信提供无限带宽。

### 3. 移动无线信道

无线移动通信起初是为了延伸电信网的覆盖范围和通信能力而逐步发展起来的。迄今,移动网的发展令人惊异,已从城市扩展到乡村与边远地区。我国移动用户已达 1.6 亿以上,并已经与传统的固定电话(PSTN)相匹敌。下一代的移动通信将以宽带方式接入,与现行 GSM 系统相比,其传输速率增加 10 倍、上百倍,可支持多媒体业务,并广泛实施个人通信系统(PCS)。

移动通信以蜂窝方式组网,信道具有多径衰落与时变特征。目前,GSM 移动通信利用 900 MHz 频段,双向频谱为  $2 \times 25$  MHz,各提供 125 个载波,每载波包括 8 个时分多址(TDMA)信道。于是各载波 200 kHz 带宽,包含 8 个 25 kHz 信道,用户数字电话速率为 13 kbit/s,具有高纠错能力的差错保护位时,净速率高达 9.8 kbit/s。移动网在每个蜂窝小区设有一个基站,转发小区内多达上千个用户同时通信。移动通信每个信道的辐射功率应控制在它的 25 kHz 带宽内,带外辐射衰减应至少为 -40 dB,优质系统应达 -70 dB,才不至于明显干扰相邻话路。隔离 1 至 2 个小区可以重复利用频率,因此整个移动网可支持极大量用户相互通信。通过越区切换和跨网漫游可以实现全国性、世界范围内的移动通信。

### 4. 卫星信道

卫星信道是一种特殊的无线信道。在地球赤道上空 35 978 km(近似称 3.6 万 km)均匀分布着三个同步卫星,就可以通过它们的转发器(Transponders)使地球上任两处的地球站间进行通信。自 20 世纪 60 年代初(1962 年)问世以来,至今稳定使用的上行 6 GHz、下行 4 GHz 频点的系统,总带宽 500 MHz,并提供带宽各为 36 MHz 的 12 个转发器,各又能容纳 1 200 路数字电话或 25~150 个窄带会议电视。一个转发器可支持五六个行将推广的 HDTV(高清晰度数字电视)。由于跨洋卫星通信(如中美两国间)需经由两个卫星的转发器与双方地球站沟通信息,因此远达 15 万 km 的距离,通信延迟则高达将近 0.5s,双方对话均有明显延时的感觉。目前,国内卫星通信已开办大量业务,如卫星电视节目、远程教育等。

## 1.4 通信频段的划分

上面介绍了通信信道分类与特征,并列举了几种常用信道基本性能及适用情况。各种通信系统对使用信道的频段还有一个选择性与合理性分配问题,以便合理利用并尽量节省频谱资源,满足有效与可靠传输的要求。

对于有线信道,重要的是选择不同的传输媒体和宽带媒体的信道频率复用。一般根据信道业务要求,考虑它们各自所要求的前述有线信道(恒参)的性能特征,如损耗、延时与相移特性,以及最低与最高截频等,来确定频段。

海底通信适于极低频段,则有很好的传输性能;任何基带信号传输采用基带信号带宽为截频的全部低频段,模拟话音的低频传输只利用 300~3 400 Hz 或优质声音(音乐)从 50 Hz 至 15 kHz 带宽。

比较复杂的问题是,各种无线通信要根据空间电磁波传播特点,来选择与适当分配工作频段。国际电信联盟无线委员会(ITU-R)对频谱分配进行了具体规划,各国各部门均科学而严格地控制频点使用。

电磁波由发射到接收的途径大体分为三种:一是靠地面传播的称为“地波”,二是靠空间两点间直线传播的称为“空间波”,三是靠地球上空的电离层反射到地面的单跳或多跳方式传播的称为“天波”。

沿地表传播的地波,因沿地面电磁波跳跃性传播产生感应电流,会受到地面这种非良导体衰减,且频率越高,集肤效应越大,损耗就越大。因此,地波适于中长波和中波(即几百千赫到数兆赫),如民用广播从 535 kHz 至 1 605 kHz 频段(每 10 kHz 一个节目)就是一例。

数兆赫到数十兆赫的短波(高频段)适于天波传播,收发间距离远大于地波,可达数百公里到上千公里,这决定于天线入射角大小。上面已提到,电离层会对反射的电磁波进行吸收、衰减,电离浓度越大则损耗越大,而这种因电离层随机变化导致的电磁波起伏衰减就是衰落现象。

如果波长更短,即更高频段,如数百兆赫到数个吉赫( $10^9$  Hz)以上,则进入微波波段。这一频段的电磁波,电离层的吸收很少,且不再被反射回地面。如卫星通信,电磁波可穿透电离层传播到卫星。这种空间波传播与光有类似性,不但直线传播,而且电磁波也有绕射(衍射)作用,可以绕过一些局部障碍物。例如,微波接力属地面点与点之间直线传播,除了要受地面环境(沼泽、山、林等)一定影响外,天线不便架设过高,因此接力(中继)段不过四五十公里,通常称为“视距”通信。

无线通信均需使收发天线长度与波长匹配,天线尺寸为 $\frac{1}{4}$ ,因此利用全向天线的民用广播的电台天线不可能稳定架设 100 多米。利用 900 MHz 频段的 GSM 手机天线,可以短至几厘米长,为移动手机小型化和便携带来很大方便。

全部无线通信均通过自由空间传播,为了合理使用频段,各地区各种通信又不致互相干扰,ITU 科学地分配了各种通信系统所适用的频段,如表 1-2 所示。

表 1-2 通信使用频段划分

频段	符号	名称	波长	主要用途
30 ~ 300 Hz	ELF	特低频	$10^4 \sim 10^3$ km	海底通信,电报
0.3 ~ 3 kHz	VF	音频	$10^3 \sim 10^2$ km	数据终端,实线电话
3 ~ 30 kHz	VLF	甚低频	$10^2 \sim 10$ km	导航,电报电话,频率标准
30 ~ 300 kHz	LF	低频	$10 \sim 1$ km	导航,电力通信
0.3 ~ 3 MHz	MF	中频	$10^3 \sim 10^2$ m	广播,业余无线电通信,移动通信
3 ~ 30 MHz	HF	高频	$10^2 \sim 10$ m	国际定点通信,军用通信,广播
30 ~ 300 MHz	VHF	甚高频	$10 \sim 1$ m	电视,调频广播,移动通信
0.3 ~ 3 GHz	UHF	超高频	$10^2 \sim 10$ cm	电视,雷达,遥控遥测
3 ~ 30 GHz	SHF	极高频	$10 \sim 1$ cm	卫星和空间通信,微波接力
30 ~ 300 GHz	EHF	特高频	$10 \sim 1$ mm	射电天文,科学研究

表 1-2 中按 10 倍频程划分波段,且利用频率  $f$  及其波长关系,即

$$= \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ (m/s)}}{f} \quad (1-20)$$

表 1-2 中同时列出了各频段频率与其波长对应值及其名称,由国际电信联盟无线委员会 (ITU-R) 颁布,各国、各地区、各城市均设有相应的无线电管理委员会,负责本国、本地区无线频点的合理协调。

## 1.5 通信系统质量指标

### 1.5.1 通信质量概述

一个单独的通信系统,或者在网络环境中构成的通信系统,其通信质量即业务质量, QoS (Quality of Services) 是一个指标体系。无论是模拟通信还是数字、数据通信,尽管业务类型和质量要求各异,它们都有一个总的质量指标要求,即有效性与可靠性指标。

影响通信质量的因素可分为两个方面。一是前面已经介绍过的广义信道的特征及种种限制因素,二是表示信息本身的信号或编码方式和传输(调制解调)方式。

有效性与可靠性是相辅相成的两个质量指标体系,模拟与数字通信又有所不同。

### 1.5.2 通信系统有效性技术

模拟通信系统中,每一路模拟信号需占用一定信道带宽,如何在信道具有一定带宽时充分利用它的传输能力,可有几个方面的措施。其中两个主要方面,一是多路信号通过频率分割复用,即频分复用(FDM),以复用路数多少来体现其有效性,如同轴电缆最高可容纳 10 800 路 4 kHz 模拟话音信号。目前使用的无线频段为  $10^5 \sim 10^{12}$  Hz 范围的自由空间,更是利用多种频分复用方式实现各种无线通信。另一方面,提高模拟通信有效性是根据业务性质减少信号带宽,如话音信号的调幅单边带(SSB)为 4 kHz,就比调频信号带宽小数倍,但可靠性较差。

数字通信的有效性主要体现在一个信道通过的信息速率。对于基带数字信号可以采用时分复用(TDM)以充分利用信道带宽。其他复用方式还有前面提到的空分复用(SDM)、码分复用(CDM)、极化复用(PDM)和波分复用(WDM),以及相应的“多址”方式。数字信号频带传输,可以采用多元调制提高有效性。如  $M$  进制信号是二进制信号信息量的  $\text{lb } M$  (即  $\log_2 M$ ) 倍,它们的信息量单位分别为波特(Baud, Bd)和比特(bit),因此

$$1 \text{ Bd} = (\text{lb } M) \text{ bit} = k \text{ bit} \quad \text{及} \quad M = 2^k$$

两种速率之间关系为

$$R_b = R_B \text{ lb } M = k R_B$$

式中,  $R_b$  为二进制信号传输速率, bit/s;  $R_B$  为  $M$  进制信号传输速率,即波特率, Bd。

另外,为了利用有限的信道带宽支持信源信息量大的通信业务传输,根据信息理论可以采用信源压缩编码,即消除源信息中冗余部分,如电视信号中只含有大约 4% 的有效信息,采用无失真压缩编码,可能达到 30 多倍的压缩率。更进一步,根据不同应用要求的精度,由香农率

失真理论,还可以去掉一些次要信息,这种有损压缩编码,往往可以压缩上百倍以上,如多媒体会议电视及可视电话,可以分别利用 2 Mbit/s 速率的 PCM 系统和 3 kHz 带宽的 PSTN(公用交换电话网)进行传输,以便满足一般需要。

近几年随着宽带接入网(AN)的发展,模拟电话线通过高速 Modem,如 ADSL、xDSL 等,可以扩展为支持数兆比特速率的多媒体业务。

### 1.5.3 通信系统可靠性技术

上面已经提到,通信可靠性与信道特征及其内部、外部干扰有密切关系,同时与通信业务性质,以及设计的信息表示形式(信号)也有直接关系。

对于模拟通信系统,可靠性通常以整个系统的输出信噪比来衡量。一般通信系统,特别是卫星通信系统,发送信号功率总是有一定限量,而信道噪声(主要是热噪声)则随传输距离而增长,其功率不断累积,并以相加的形式来干扰信号,这种干扰称为加性干扰。信号加噪声的混合波形与原信号相比则具有一定程度失真。模拟通信的输出信噪比越高,通信质量就越好。诸如,公共电话(商用)以 40 dB 为优良质量,电视节目信噪比至少应为 50 dB,优质电视接收应在 60 dB 以上,公务通信可以降低质量要求,也需 20 dB 以上。当然,信噪比并非惟一的衡量质量的指标。

提高模拟信号传输的输出信噪比,固然可以提高信号功率或减少噪声功率,但提高发送电平往往受到限制,如卫星通信因成本等因素,功率是受限制的。一般通信系统,若提高信号电平会干扰相邻信道的信号。抑制噪声可从广义信道的电子设备入手,如采用性能良好的电子器件,并精良设计电路。一旦构成系统后,欲降低噪声干扰也非易事。

在实际中,常用折中办法来改善可靠性,即以带宽(有效性)为代价换取可靠性,可提高输出信噪比——涉及信号的调制方式。例如,宽带调频(FM)比调幅多占几倍或更大带宽,解调输出信噪比改善量与带宽增加倍数的平方成正比。如民用调幅广播,每台节目 10 kHz 带宽,而调频台节目带宽为 180 kHz,但信噪比增大十几倍,因此音质极好。

另外,同一种调制方式,不同的解调方式的可靠性也不同。

首先,数字通信可靠性因素就其本质来说,还是信噪比问题,另一因素是设计信号本身的抗扰能力。但数字信号传输最终反映在判决输出的码元符号是否正确,因此其可靠性指标均为码元或码字的差错概率  $P_e$ ,即一定时间内的平均差错率。一般通信系统,差错率主要决定于信噪比输出大小。

提高数字系统的可靠性,减少误差率的措施,首先从香农信道容量公式来奠定一个基本思路,该著名公式为

$$I_c = T_c C_t = B_c T_c \lg \left( 1 + \frac{S_c}{N_c} \right)$$

式中,  $I_c$  为信道容量, bit;  $C_t$  为每秒信道容量, 即信道允许每秒钟无失真传输的信息量, bit/s;

$T_c$  为信道传输时间, s;  $B_c$  为信道带宽, Hz;  $S_c/N_c$  为信道允许的功率信噪比;  $\lg \left( 1 + \frac{S_c}{N_c} \right)$  为信道的动态范围。

上列公式的概念表明,当通过信道传输的信息总量  $I_s$  不超过信道容量  $I_c$  时,信号本身的