

高等学校教材

现代通信理论

上海交通大学 王维一 主编



高等学校教材



现代通信理论

上海交通大学 王维一 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

现代通信理论

上海交通大学·王维一 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.5印张 393千字
1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 0001—1690册

ISBN 7-120-01936-8/TP·69

定价 8.00元

内 容 提 要

本书主要讲述现代通信理论基础,其中包括随机信号分析、模拟调制方法及抗噪声性能、模拟信号数字技术、基带传输系统中的符号间干扰及自适应均衡、数字调制技术和最佳接收理论。全书叙述严谨,物理概念深刻明确,数学推演论证严密简明。

本书可作通信、无线电技术、电子工程专业的本科生教材,也可作通信、电子系统和信号、信息处理专业的硕士研究生教材,亦可供从事通信工程与无线电技术的技术人员参考。

前 言

本书由能源部通信类专业教学协作组审定，并推荐出版。

随着大规模集成电路（LSI）及超大规模（VLSI）集成电路技术的迅速发展，以及数字电子计算机的广泛应用，各种通信方式都由模拟通信向着数字通信过渡。数字通信的优点是显而易见的，尤其是它可凭借微电子和计算技术，把数字信号处理理论应用于现代通信系统中。这些新技术的汇合，促进了通信领域的面貌迅速而深刻的变化。

本书旨在阐述现代通信系统所涉及的新的理论、分析方法和应用技术，重点放在数字通信方面。

全书共分七章，主要内容是：第一章简单叙述通信系统模型，勾画出通信系统全貌，并介绍通信理论的重要概念；第二章阐述平稳随机过程理论，引入随机信号的分析方法和窄带噪声过程；第三章讲解模拟调制系统，并借助窄带噪声表达方法，分析其抗噪声性能；第四章叙述模拟信号数字化方法，重点是分析PCM的取样、量化和编码过程，并且把自适应过程引入DPCM中；第五章叙述基带传输系统中的符号间干扰，以及横向滤波器和自适应算法等；第六章阐述数字调制方法，并且有重点地分析了几种新型数字调制技术；第七章叙述几种最佳准则的接收系统，其中包括匹配滤波器、相关接收器、维纳滤波和最佳接收机等。为了配合书中内容的学习，每章都附有习题，以帮助正确理解书中概念和熟练解题技巧。

本书第一、三、四章由上海交通大学王维一老师编写，第二、五章由上海交通大学韩声栋老师编写，第六、七章由华北电力学院北京研究生部叶秉堃老师编写（其中第七章中第二、三节部分内容由王维一编写），并由王维一任主编。本书由上海交通大学归绍升教授审阅。

本书可供通信工程、无线电技术和电子工程等专业的低年级大学生和一年级研究生作为教材，也可供通信工程有关技术人员阅读参考。

限于编者水平，书中错误之处敬请批评指正。

编 者

1992年7月

目 录

前 言

第一章 通信系统概论	1
第一节 通信系统的模型	1
第二节 通信系统的质量指标	3
第三节 传输信道	4
第四节 信息的度量与信道容量	10
习题	15
第二章 随机信号和噪声	16
第一节 随机过程基本概念	16
第二节 广义平稳过程及各态遍历性	23
第三节 随机过程的功率谱密度	28
第四节 线性系统对随机信号的响应	33
第五节 高斯过程和白噪声过程	36
第六节 离散时间随机信号	42
第七节 窄带随机过程	47
第八节 正弦信号加窄带噪声的包络和相位	53
习题	57
第三章 模拟调制系统	65
第一节 幅度调制	65
第二节 幅度调制系统的抗噪声性能	74
第三节 角度调制	81
第四节 角度调制系统的噪声	89
第五节 加重技术	95
第六节 频分多路复用 (FDM)	97
习题	99
第四章 模拟信号的数字传输	104
第一节 模拟信号的取样	104
第二节 模拟信号的量化	106
第三节 编码	113
第四节 PCM通信系统	118
第五节 增量调制 (DM)	123
第六节 差值脉冲编码调制 (DPCM)	129
习题	135
第五章 自适应均衡	138
第一节 数据传输中的符号间干扰	138
第二节 无ISI的带限信号设计——奈奎斯特 (Nyquist) 第一准则	139

第三节	部分响应信号·····	144
第四节	时域均衡及其最佳准则·····	151
第五节	横向均衡器的结构形式·····	156
第六节	最小均方误差均衡器·····	158
习题	·····	171
第六章	数字调制技术 ·····	174
第一节	引言·····	174
第二节	二进制数字幅度调制技术·····	175
第三节	正交幅度调制技术·····	182
第四节	数字频率调制技术·····	191
第五节	最小频移键控 (MSK) ·····	199
第六节	二进制数字相位调制技术·····	205
第七节	多进制数字相位调制技术·····	214
习题	·····	227
第七章	最佳接收理论 ·····	229
第一节	最大信噪比准则——匹配滤波器·····	229
第二节	相关接收系统·····	240
第三节	维纳滤波理论·····	245
第四节	理想接收机理论·····	253
习题	·····	263
附录	·····	266
附录一	误差函数·····	266
附录二	英汉名称对照表·····	268
参考文献	·····	270

第一章 通信系统概论

本章目的是介绍通信系统的基础和简要叙述信息论的基本概念，其内容为各种通信系统的组成及特点；评估通信系统的性能指标；讨论各种类型信道的共同特性，以及造成传输信号失真的原因；最后，扼要介绍信息的度量和信道容量等基本知识。

第一节 通信系统的模型

通信是指消息的传递和交换，即互通信息。在现代通信中，要传送的消息有语言、文字、图像、符号、数据等各种类型。利用“电”来传递消息的途径有有线通信、短波超短波通信、微波通信、卫星通信、光纤通信和计算机通信等各种方式。尽管通信的对象和类型有各种形式，然而，我们将按照通信的目的，传输信号的性质，对典型通信系统的各个组成部分进行分析。

一、通信系统的组成

图1-1表示一个高度概括的通信系统模型。下面介绍图中各个方框的意义。

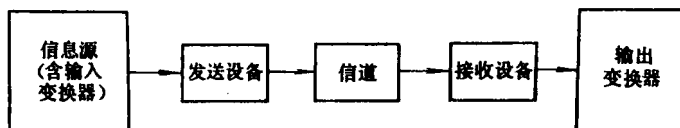


图 1-1 通信系统模型

信息源简称信源（含输入变换器）：是产生传送消息的源。例如，人类活动的语言、电视图像、电传报文或计算机数据等。信源发出消息的形式，可以是连续的，也可以是离散的。如果信源输出的消息是非电的，必须通过输入变换器把它转变为电信号。例如，电话通话时，话机就是变换器。由变换器输出的信号称为消息信号或者基带信号。话机输出的基带信号的频率通常限制在 $300 \sim 3400\text{Hz}$ ，电视图像信号的频率在 $0 \sim 6\text{MHz}$ 内。信号所占的频率范围，称为信号带宽。

发送设备：它的功能是把消息信号经过处理变换后送入信道。有时也可以由输入变换器把信号直接送入信道传输，这种传输称为基带传输。基带信号的处理变换包括信号的放大、滤波和调制，其中最重要的是调制。所谓调制，就是把基带信号的频谱搬移到一个较高的频谱范围内，以适应信号在信道内有效地传输。

信道：是传输各种电磁波的媒质。最常见的有有线电缆、无线电传播的自由空间。目前迅速发展的光纤通信和卫星通信系统，光缆和人造卫星与地面站之间空间也是传输信息的信道。尽管随通信模式不同，有各种类型的信道，但其共同特点是：信号经过信道传输后，其波形将发生失真，并受到干扰噪声的污染。

接收设备：它的功能是从接收信号中提取所需消息信号，并把它变换到适合于输出变换器所要求的信号型式。同样，其中解调（调制的逆变换）是最重要的。

输出变换器：能把基带信号转变为用户所能接受的信号型式。扬声器、电传打字机和电视机等是该变换器的实例。

二、模拟通信、数字通信和数据通信

通信所传输的消息是多种多样的。然而，表示各种消息的传输信号，按其特点可以分为两类：一类是模拟信号，即可以表达为时间连续函数的波形。模拟的含义是指用电参量（如电压、电流）的变化来模拟信源发出的信号。另一类是数字信号，其特征是在时间上和幅度上的取值都是离散型的。

（一）模拟通信

以模拟信号来传送消息的通信方式，称为模拟通信。模拟通信系统的组成与图1-1所示相仿，其中发送设备主要是模拟调制器，而接收设备是相应的解调器。有关模拟调制和解调原理的内容在第三章中详细讨论。

（二）数字通信与数据通信

数字通信和数据通信都是用数字信号来传送消息的。由于数字通信相对于模拟通信有下列优点：

（1）数字信号便于产生、存贮、交换，也便于与计算机联用；

（2）在干扰情况下，数字信号易于检测，且可在中继站再生信号，消除传输中波形误差的累积；

（3）便于实现抗干扰和保密编码，来提高通信的可靠性和保密性；

（4）便于电路集成化，也易于利用现代固体器件和计算技术的研究成果。

因此，从模拟通信过渡到数字通信是现代通信的目标之一。

图1-2表示一个数字通信系统模型。它与图1-1的区别是增加了信源编码、信源译码、信道编码及信道译码，并且调制器和解调器都是采用数字调制和数字解调技术。

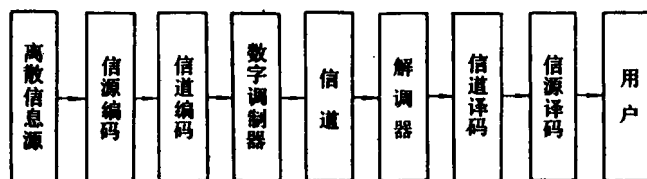


图 1-2 数字通信系统模型

信源编码的作用是降低信息的多余度，其目的是减少码元数目，降低码元速率。多余度就是信息码流经过信源编码后，减少不必要的码元，并在信源译码时，仍能恢复和辨认。另一方面，如果信源输出的是模拟信号，信源编码将其取样、量化和编码后，转换为数字信号，称为模/数变换（ A/D 变换）。

信道编码又称纠错编码（或称抗干扰编码），其作用是在信源编码输出的码流中（数字信号），人为地按一定规则加入多余码元。以便在接收端信道译码时，发现错码或者纠正错码，从而提高通信的可靠性。

对于一个具体的数字通信系统,信道编译码视需要而用,并不是所有数字通信系统都设置。当然,有些通信系统需要附加保密,这时,在系统的发送端和接收端,应分别加设保密器和解密器装置。此外,在任何数字通信系统中,同步系统是必不可少的,图1-2中并未画出。

数字通信与数据通信习惯上区分方法是:将模拟消息经数字化处理后,用数字信号的形式来传送的通信方式,称为数字通信;而把信源本身发出的数字形式的消息(如电子计算机或其它数字终端作为信源发出的数据、指令等),不管用何种形式的信号来传输这类消息的通信方式,均称为数据通信。

数据通信是电子计算机与通信相结合的一种通信方式,它利用快速传输数据的通信技术和数据处理、存贮的计算机技术,给用户及时、准确的信息。数据通信的发展使计算机的用户可以远距离使用计算机,计算机也可以远距离进行实时数据收集和对系统进行实时控制。这就使计算机的作用超越了地理位置的限制,大大地扩大了计算机的应用范围。60年代末,有名的美国ARPA计算机网诞生,初次实现了位于不同地点,不同种类的计算机与计算机的通信和资源共享(计算机资源包括硬件、软件和数据),从而使计算机与通信的结合更加紧密,形成了计算机通信网络。

第二节 通信系统的质量指标

通信系统的质量指标通常包括电气性能、工艺结构和使用维修等方面。但从传输信号角度看,其质量指标主要为有效性和可靠性。通信的有效性是指传输信息的速率,也即在给定的频带内能够传输多少信息。而通信的可靠性则表示准确通信的程度。然而,在设计中有效性和可靠性这两个要求,往往互相矛盾。通常只能在满足一定可靠性的指标下,尽可能提高通信系统的有效性。

一、模拟通信系统的质量指标

(一) 有效性

对模拟通信来说,信号传输的有效性通常可用有效传输频带来衡量,即在指定信道带宽内容许同时传输的最多通路数。每一路信号的有效带宽与模拟调制方式有关。在相同条件下,每路所占频带越窄,则容许同时传输的通路数越多。

(二) 可靠性

模拟通信系统的可靠性通常采用接收端的输出信号平均功率和噪声平均功率之比来衡量,称功率信噪比,简称信噪比,记作 S/N 。在相同条件下,系统的输出信噪比越高,通信质量就越好,互通信息就越准确。例如,一般民用电话通信的 $S/N = 40\text{ dB}$ 时,能听清95%以上。

二、数字通信系统的质量指标

(一) 有效性

数字通信系统的有效性可用码元速率或符号速率来衡量。在数字信号中,每个二进制信号的取值为“1”或“0”,每个“1”或“0”称为一个码元。各码元都占有相等的时间。

间间隔, 这个间隔称为码元长度。

1. 码元速率 R_B

每秒钟传送码元的数称为码元速率。当码元长度为 T , 则码元速率

$$R_B = \frac{1}{T}$$

码元速率又称符号速率或信号速率。单位为波特 (Baud), 可简写为Bd。

2. 信息速率 R_b

信息速率是每秒钟传送的信息量, 记作 R_b , 单位为比特/秒(binary digit简写为bit), 或写作bit/s。

在二进制中, 码元速率和信息速率在数值上相等, 但它们的单位是不同的。例如, 二进制数字信号的码元速率为75Bd, 则信息速率为75bit/s。

3. 频带利用率

数字通信有效性指标除了用码元速率和信息速率外, 还可以用频带利用率来衡量。频带利用率是指单位频带内能够传送码元的速率, 即每赫兹波特数。则频带利用率

$$\eta = \frac{\text{码元速率}}{\text{频带宽度}} \quad \text{Bd/Hz} \quad (1-1)$$

(二) 可靠性

数字通信系统的可靠性由差错率指标来衡量, 通常有两种表示方法, 即误码率 P_e 和误信率 (误比特率) P_b 。

1. 误码率

$$P_e = \frac{\text{差错码元数}}{\text{传输的码元总数}} \quad (1-2a)$$

例如, 经过长时间统计, 平均传输10000个码元中差错一个码元, 则误码率 $P_e = 10^{-4}$ 。

2. 误信率

$$P_b = \frac{\text{错误消息的比特数}}{\text{传输消息的总比特数}} \quad (1-2b)$$

二进制时, $P_b = P_e$ 。

数字通信系统对质量指标的要求通常用 R_B 和 P_e 表示。码元速率 R_B 越大, 有效性越好; 数字信号占用带宽越宽, 则抗噪声性能越差, 即误码率越大。

误码率 P_e 越小, 通信的可靠性越高。对 P_e 的要求与所传输的消息有关, 一般通数字电话时要求 $P_e \leq 10^{-3}$, 而传输数据时要求 $P_e \leq 10^{-5} \sim 10^{-6}$, 甚至有更高的要求。

第三节 传 输 信 道

信道是通信系统的一个组成部分, 它是连接发送设备和接收设备之间的传输媒质, 组成传输信号的通路。按照传输媒质, 可以分为有线信道 (包括架空明线、对称和同轴电缆、光缆) 及无线信道 (如利用收发天线和自由空间作为媒质) 两大类。

通常把传输媒质的信道称为狭义信道，而把发送端调制器输出和接收解调器输入端之间的放大、天线电路和传输媒质组成的信道称为广义信道。由于后者传送已调信号，又称调制信道。如果把发送端的调制器和接收端的解调器也包括在内，则称为编码信道。它们之间关系如图1-3所示。

由于信道特性的不完善，信号经信道传输后，往往发生振幅失真和相位失真（或群时延失真），从而造成波形失真。信道除了使信号波形失真外，还存在着各种干扰和噪声，损害传输信号。不管是狭义信道还是广义信道，总可以用一个具有输入和输出端的网络表示，如图1-4所示。

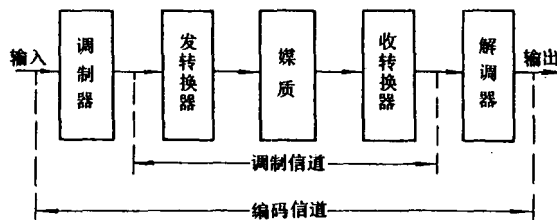


图 1-3 调制信道与编码信道

一、无记忆信道

无记忆信道是指信道内只存在起伏噪声，它的输出数字序列码元仅依赖于输入数字序列的相应码元和信道特性，而与前后码元的差错无关。

编码信道是传输编码后的数字序列码元，大多数的编码信道是属于无记忆的。无记忆编码信道可以用转移概率来表示，二进制信道模型如图1-5所示。

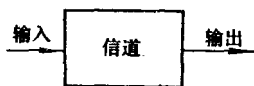


图 1-4 信道网络

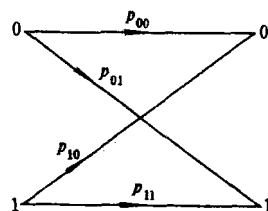


图 1-5 二进制信道模型

对于二进制信号来说，信道传输的是1码或0码。信道特性可用四个条件概率表示，这里称为信道转移概率，它们的关系是

$$p(0/0) + p(1/0) = 1$$

$$p(0/1) + p(1/1) = 1$$

式中 $p(0/0)$ ——表示发送0码，接收为0码的概率，简写为 p_{00} ；

$p(1/1)$ ——表示发送1码，接收为1码的概率，简写为 p_{11} ；

$p(1/0)$ ——表示发送0码，接收为1码的概率，简写为 p_{01} ；

$p(0/1)$ ——表示发送1码，接收为0码的概率，简写为 p_{10} 。

p_{00} 、 p_{11} 为正确转移概率， p_{01} 、 p_{10} 为错误转移概率。转移概率矩阵为

$$[T] = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

如果信道不存在噪声和不使信号失真，则转移概率矩阵 $[T]$ 是单位矩阵，即当 $i = j$ 时（ i, j 为0或1）， $p_{ij} = 1$ ；当 $i \neq j$ 时， $p_{ij} = 0$ 。并且根据转移概率性质， $[T]$ 矩阵每一行元素之和为1。

由无记忆二进制的编码信道模型, 容易推论到无记忆的任意多进制的情况中去, 下面是传送四进制信号的信道模型例子。

例 1-1 数字通信系统传输 4 种符号消息, 转移概率矩阵为

$$[T] = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{03} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

若信源发送 4 种符号的概率相等, 试求:

(1) 在传送符号过程中, 发生错误的概率;

(2) 正确传送符号的概率;

(3) 若 4 种符号表示 A 、 B 、 C 、 D , 发送符号序列为 $BADCAB$ 。求收到的符号序列为 $DADDAB$ 的概率。

解 (1) 错误概率:

$$p(e/0) = p_{01} + p_{02} + p_{03} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

$$p(e/1) = p_{10} + p_{12} + p_{13} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{5}{6}$$

$$p(e/2) = p_{20} + p_{21} + p_{23} = \frac{1}{6} + \frac{1}{2} + \frac{1}{6} = \frac{5}{6}$$

$$p(e/3) = p_{30} + p_{31} + p_{32} = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{2}{3}$$

则
$$P_e = \sum_i p(e/i) p(i) = \frac{1}{4} \times \left(\frac{3}{4} + \frac{5}{6} + \frac{5}{6} + \frac{2}{3} \right) = \frac{37}{48}$$

(2) 正确概率:

$$P_c = p_{00}p(0) + p_{11}p(1) + p_{22}p(2) + p_{33}p(3)$$

$$= \frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \right) = \frac{11}{48}$$

$$P_c + P_e = 1$$

(3) 序列为 $DADDAB$ 的概率:

由于发送符号之间相互独立, 则

$$\begin{aligned} P\{DADDAB\} &= p_{13}p_{00}p_{33}p_{23}p_{00}p_{11} \\ &= \frac{1}{6} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{6} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{10368} \end{aligned}$$

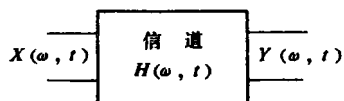


图 1-6 信道等效四端网络

二、恒参信道

调制信道是传输已调制信号, 它可以用四端网络表示, 如图1-6所示。

图中 $H(\omega, t)$ 为网络的传递函数, 即信道参数, 它

是角频率 ω 及时间 t 的函数； $X(\omega, t)$ 和 $Y(\omega, t)$ 分别为输入信号和输出信号。

如果信道参数 $H(\omega, t)$ 不随时间变化，或者说，在相当长时间中 $H(\omega, t)$ 基本不变，这种信道称为恒参信道，又称时不变信道，这时 $H(\omega, t)$ 应写成 $H(\omega)$ 。信道参数 $H(\omega, t)$ 随时间而变化的信道，称为变参信道，又称时变信道。

恒参信道的性能有振幅频率特性、相移（或时延）频率特性、频率漂移和相位抖动、电平波动等。但是最主要的性能是振幅频率特性和相移频率特性。由此，信道特性表示为

$$H(\omega) = A(\omega)e^{-j\theta(\omega)} \quad (1-4)$$

式中 $A(\omega)$ ——幅度频率特性；

$\theta(\omega)$ ——相位频率特性。

如果

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= A \\ \theta(\omega) &= \omega t_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

即幅频特性与频率无关，相频特性是一条通过原点的直线，则信号通过传输信道不发生失真。

1. 幅度失真

幅度失真是指信号通过信道时，信号的不同频率分量分别受到不同的衰减或放大，造成输出信号波形的失真。为此，式(1-4)可表示为

$$H(\omega) = A(\omega)e^{-j\omega t_0} \quad (1-6)$$

式中 t_0 ——信道延迟常数。

分析幅度失真的方法，通常将 $A(\omega)$ 展开为傅里叶级数形式。例如，如图1-7所示，信道模型具有余弦滤波器特性，可表示为

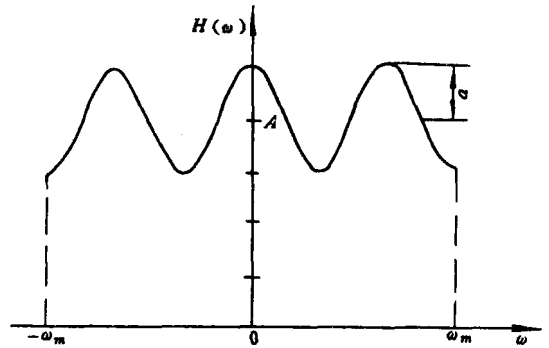


图 1-7 余弦滤波器特性（周期数 $N=3$ ）

$$H(\omega) = \left(A + a \cos \frac{N\pi}{\omega_m} \omega \right) e^{-j\omega t_0}$$

$$= A e^{-j\omega t_0} + \frac{a}{2} \left\{ \exp \left[j\omega \left(\frac{N\pi}{\omega_m} - t_0 \right) \right] + \exp \left[-j\omega \left(\frac{N\pi}{\omega_m} + t_0 \right) \right] \right\}$$

当输入带限信号 $x(t)$ 时，则信道输出为

$$y(t) = A x(t - t_0) + \frac{a}{2} x \left(t + \frac{N\pi}{\omega_m} - t_0 \right) + \frac{a}{2} x \left(t - \frac{N\pi}{\omega_m} - t_0 \right)$$

上式说明，输出信号由经过时延 t_0 的 $Ax(t) + \frac{a}{2}x\left(t + \frac{N\pi}{\omega_m}\right) + \frac{a}{2}x\left(t - \frac{N\pi}{\omega_m}\right)$ 所组成。如图1-8(a)为输入信号波形，则图1-8(b)为输出信号波形实线4，它由倍乘因子为 A 的 $x(t)$ 虚线1和位移为 $\pm \frac{N\pi}{\omega_m}$ 且倍乘因子为 $\frac{a}{2}$ 的回波虚线2、3叠加组成，由此造成输出波形失真。

2. 相位失真

相位失真是指信道的相位-频率特性呈非线性关系, 致使传输信号发生畸变。图1-9表示信道的相位-频率特性关系, 图中通过原点的直线(虚线)表示理想信道的相频特性, 即 $\theta(\omega) = \omega t_0$, 这时信号通过信道后不发生畸变。图上实线表示实际信道的相频特性。

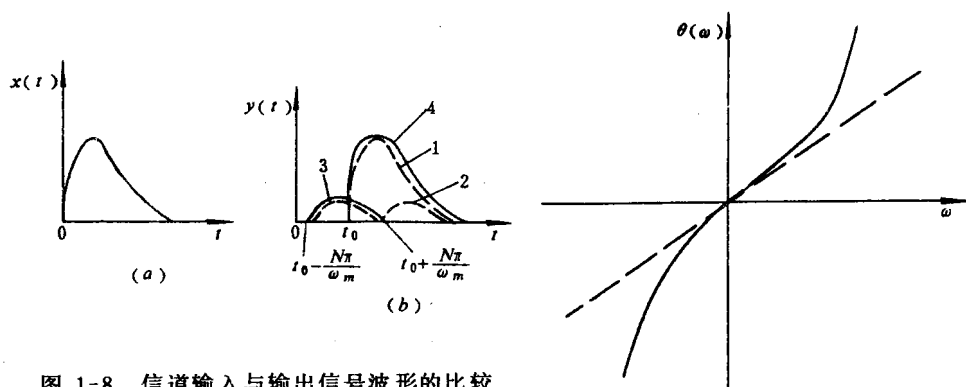


图 1-8 信道输入与输出信号波形的比较

(a) 输入信号波形; (b) 输出信号波形

图 1-9 相位-频率特性

相位失真可以用时延来衡量。相位时延定义为相位 $\theta(\omega)$ 与角频率 ω 之比, 用 t_{ph} 表示

$$t_{ph} = \theta(\omega) / \omega \quad (1-7)$$

由于相位是一个多值函数, 相位时延也是一个多值函数, 因而工程上习惯采用群时延表征相频特性, 它是由相位对角频率的微分来确定的, 因而是一个单值函数, 表示为

$$t_{gr}(\omega) = d\theta(\omega) / d\omega \quad (1-8)$$

幅度和相位失真都能引起信号波形的畸变。但是实践证明话音和音乐一类的消息, 由于人耳听觉的特点, 对幅度失真引起的波形畸变十分敏感, 而对相位失真引起的波形畸变几乎感觉不出来。所以, 电话信道规定了严格的衰减失真容限, 而对相位失真通常不考虑, 但是对于传输数据或图像信号的信道, 幅度失真和相位失真引起的波形畸变都会对传输质量造成损害。例如, 使用一个带有相位失真的信道传输数据码元, 由于相位失真引起码元信号波形展宽, 从而产生码间串扰。为了克服这些失真, 可以采用均衡器进行校正补偿。

典型的恒参信道有: 有线信道、微波接力信道、人造卫星信道等。

三、变参信道

变参信道的传输函数 $H(\omega, t)$ 随时间 t 而变。短波电离层反射、超短波及微波对流层散射等信道属于变参信道。

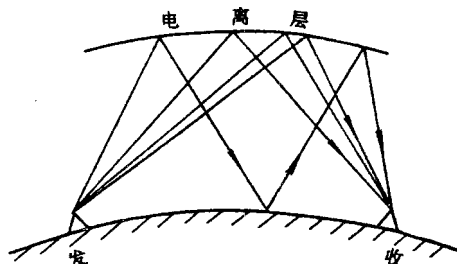


图 1-10 多径传输模型

变参信道的一个共同特点是多途径传输, 就是同一发射信号可以通过不同的传输路径以不同的传输时间到达同一接收点。图1-10示出电离层反射引起多径传输的模型。图中由发射天线发出的电波, 经过电离层反射后可能有多条路径到达接收天线。其中包括返回地面后第二次再经电离层反射的电波, 称为双跳; 直接

经电离层一次反射到达接收天线的电波，称为单跳。

所以，接收天线收到的电波，将是各条传播路径到达接收点的信号矢量和。经过不同路径到达接收点的电波会相互干扰，有可能同相相加，也有可能反相相减，并且变参信道特性的变化是无法预知的，这样就造成了接收点信号强度随机地变化，使信号强度减弱，这种现象称为衰落。

下面简单介绍由两条路径到达接收点的多径传输特点。假设图1-10上只有两条路径到达接收点，且信号强度相等，那么图1-10可用图1-11(a)的延时线模型来等效。

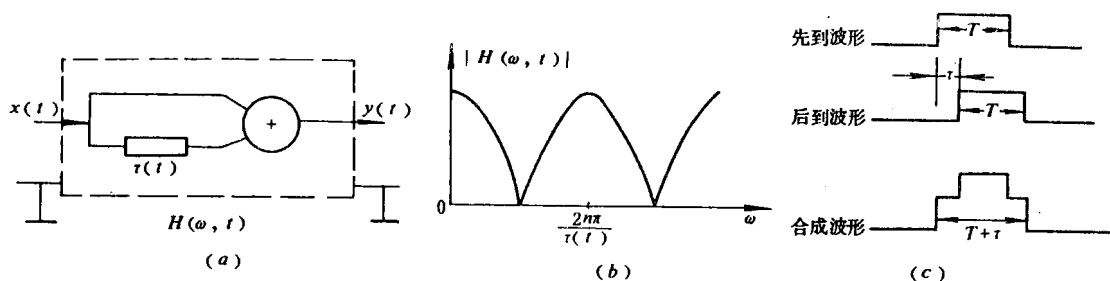


图 1-11 两条路径的多径效应

(a) 延时线模型；(b) 信道传输函数曲线；(c) 数字波形展宽示意

设输入信号为 $x(t)$ ，相对延时差为 $\tau(t)$ ，延时信号可表示为 $x[t - \tau(t)]$ 。于是输出信号 $y(t)$ 为两者之和，即

$$y(t) = x(t) + x[t - \tau(t)] \quad (1-9)$$

于是信道传输函数为

$$H(\omega, t) = 1 + e^{-j\omega\tau(t)} \quad (1-10)$$

它的模值为

$$\begin{aligned} |H(\omega, t)| &= |1 + \cos \omega\tau(t) - j\sin \omega\tau(t)| \\ &= \left| 2\cos^2 \frac{\omega\tau(t)}{2} - j2\sin \frac{\omega\tau(t)}{2} \cos \frac{\omega\tau(t)}{2} \right| \\ &= 2 \left| \cos \frac{\omega\tau(t)}{2} \right| \end{aligned} \quad (1-11)$$

图1-11(b)为上式的图解。可以看出，对不同的频率，信道衰减是不同的。两个极端的情况是：在 $\omega = \frac{2n\pi}{\tau(t)}$ 处（ n 为整数），两路径到达接收点的信号同相相加，出现传输极点；在 $\omega = \frac{2(n \pm 1)\pi}{\tau(t)}$ 处，两路径到达接收点的信号反相抵消，出现传输零点。由于相对延时差 $\tau(t)$ 是随时间而变的量，所以图1-11(b)中各传输零点与极点在频率轴上的位置也随时而变。可见，信道衰减随着频率和时间不断变化。如果传输路径数目增多，那么信道传输函数更加复杂。上述分析的信道衰减随频率而不同的现象，称为频率选择性衰落。

图1-11(c)是多径传输造成数字波形展宽的示意图。由图可见，由于各路径到达接收

点的时间不同,使原发送宽度为 T 的波形展宽成 $(T + \tau)$, τ 是各路径间最大相对延时差。这种波形展宽现象称为时间弥散。同样,由于多径效应,在传输数字波形时,会引起数码元之间串扰。

虽然由于时间弥散及频率选择性衰落限制了码元速率,因此通常情况下必须满足 $T \gg \tau$ 。实测表明,在短波电离层信道中,各路径最大相对延时差为 $1 \sim 2\text{ms}$,有的甚至达到 4ms 。如果 $T/\tau \approx 10$,最大相对延时差为 1ms ,则码元宽度为 10ms 左右,于是码元速率为 100Bd 。

第四节 信息的度量与信道容量

通信的目的是传递信息。在通信系统设计中,自然会遇到这样一些问题。例如,信息源发出的消息是用什么量来衡量的;担负传输消息的信道允许传输多少信息量;它的极限容量是多少,等等。讨论和分析这些问题,有赖于信息理论基础。信息论是由香农(C.E. Shannon)在1948年所写的“通信的数学理论”一文奠基的。

一、信息的度量

信息源发出的每一个消息所包含的信息是不相等的,有的消息携带信息多,有的消息包含信息少,有的甚至几乎没有什么信息。那么,每个消息携带信息的多少,各个消息之间信息量的比较,是如何来衡量呢?为了回答这些问题,先举个实际例子。

假设居住在北方的某甲,计划在冬天到昆明去度假,为了了解当地的天气,打电话到昆明气象局询问。他可能收到如下三种预报之一:

- (1) 温和晴朗;
- (2) 天冷;
- (3) 可能有大雪。

从这三种预报来看,第一条消息所包含的信息最少,因为,昆明的天气大部分时间是温和晴朗的。第二条消息携带的信息比第一条消息多。第三条消息所包含的信息最多,因为昆明很少下雪,下雪会使人感到意外。从这个简单例子可以看到,消息所含信息的多少与事件发生的可能性有关系。事件发生的可能性愈大,消息携带信息愈少;事件发生的可能性愈小,消息携带信息愈多。因此,消息所含信息量依赖于潜在事件的不确定性,而不是组成消息的符号数。下面运用概率的工程定义来建立信息量的概念。

(一) 消息的信息量

假设在一个通信系统中,信息源可能发出的消息为 $m_1, m_2, \dots, m_s$,每个消息出现的概率分别为 $p_1, p_2, \dots, p_s$,当然 $p_1 + p_2 + \dots + p_s = 1$ 。根据上面实例可以知道,通信系统发端发出消息 m_k ,且 m_k 出现的概率为 p_k 时,如果接收端能准确地识别此消息,通信系统传输的信息量为 $I(m_k)$,它与消息 m_k 所出现的概率 p_k 有互逆的关系。当 p_k 趋于1时, $I(m_k)$ 趋向零,即所传送的消息是必然事件,这时就不携带任何信息量。因为通信系统所传送的消息包含一定的信息,所以,信息量 $I(m_k)$ 是一个非负的值。概括上面这些概念,信息量 $I(m_k)$ 可以归纳以下三式: