

电网远动通道 的 原理和运行

沈金官 主编

水利电力出版社

电网远动通道的 原理和运行

沈金官 主编

水利电力出版社

电网远动通道的原理和运行

沈金官 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8.5印张 187千字

1989年7月第一版 1989年7月北京第一次印刷

印数0001—3950册 定价5.35元

ISBN 7-120-00696-7/TP·28

内 容 提 要

本书系统地介绍了电网调度自动化系统远动数据通道中的调制解调器的基本原理和应用实例，对远动数据通道的构成、测试和运行也作了详细的介绍。全书分四章，内容包括：数字信号传输的基本概念，数字调频系统，数字调相系统远动通道的性能测试和运行。最后的附录介绍了数字锁相技术的原理及应用实例。

本书可供在电网调度自动化系统中从事远动工作和通信工作的工程技术人员参考，也可供有关院校的师生阅读。

前 言

随着电力系统的发展,为了保证安全、经济的发供电,电力系统调度自动化技术已经成为现代电网管理的必不可少的手段。电力系统调度自动化是一个系统工程,它由远方数据终端(RTU)、远动数据通道、调端端远动主机(MS)、后台计算机和人机联系设备等部份构成。由于现代电力系统覆盖的区域很大,所以远程数据采集和命令下达,是电网调度自动化系统中一个重要的环节,没有一个高质量的远动数据通道,调度自动化系统就无法发挥其应有的功能。本书的重点就是讨论远动数据通道中的调制解调器的工作原理以及通道的构成、测试和运行。

远动数据通道是远动技术和通信技术的接口界面,远动技术工作者若对远动数据通道没有深入的了解,就无法使性能优良的远动设备得到可靠的运行;通信工作者若对远动数据传输的要求没有全面的掌握,也无法给远动数据的传输提供优质的信道。本书的目的是想对远动数据通道的原理和运行作较为深入的讨论,在远动技术工作者和通信工作者之间搭一座桥梁,以便提高远动数据传输的质量。

本书共四章及一个附录。第一章是数字信号传输的基本概念,为以后的几章准备必要的基础。第二章是数字调频系统,本章除介绍数字调频及解调的工作原理外,还深入的讨论了国内远动技术中广泛采用的SCJ系列的调频系统。第三章是数字调相系统,介绍两相和四相数字调相和解调的工作原理,同时讨论了应用较广泛的TXT系列的调相系统。第四章是远动通道的性能测试和运行,本章根据作者的研究和现场运行的经验,介绍了远动通道构成的各种方案以及它们的特点,讨论的影响远动数据传输的各种因素,以及远动通道的测试和运行。附录中是数字锁相技术的原理和应用,为位锁相和载波锁相准备了必要的基础。

本书的第一章、第三章及附录由南京电力专科学校沈金官同志编写,第二章由南京自动化研究所李庆显同志编写,第四章由南京自动化研究所吴荣法同志编写。本书由沈金官同志任主编。

华北电力学院研究生部的鲍伟廉教授对本书进行了详细的审阅,并提出了宝贵的意见。对此,编者深表感谢。

南京电力自动化设备厂季学荣和张廷贵工程师给本书提供了TXT系列调制解调器的资料,使本书的内容更加充实具体,编者也深表感谢。

由于我们的水平有限,本书一定还存在许多缺点和错误,欢迎读者提出宝贵的意见。

编者

1988年6月

目 录

前 言

第一章 数字信号传输的基本概念	1
第一节 数字信号的表示方法	1
第二节 数字信号传输系统的模型	4
第三节 基带传输系统概述	8
第二章 数字调频系统	13
第一节 数字调频信号的分析	13
第二节 数字调频信号的产生	19
第三节 数字调频信号的解调	26
第四节 数字调频系统实例	32
第三章 数字调相系统	41
第一节 数字调相的基本概念	41
第二节 数字调相信号的产生	46
第三节 数字调相信号的解调	55
第四节 两相数字调相系统实例	68
第五节 四相数字调相系统实例	74
第四章 远动通道的性能测试和运行	85
第一节 远动通道的构成和连接	85
第二节 远动通道的传输质量要求	94
第三节 远动数据信号的传输损害	97
第四节 调制方式的性能比较	110
第五节 调制解调器的测试	113
第六节 远动通道的测试和运行	116
附录 数字锁相技术的原理和应用	121
第一节 数字锁相技术的基本原理	121
第二节 数字锁相环路的实例	126

第一章 数字信号传输的基本概念

在电网调度自动化系统中，为了监测和控制电网的运行状态，必须采集各发电厂、变电站的运行状态信息和向有关厂、站发送各种询问和控制命令，因而需要传输信息。这些信息目前基本上都变换成数字信息后，用数字信号的形式来传送的，例如，设置在发电厂或变电所的 RTU（远方数据终端），将变送器传递来的反映电网运行状态的模拟信息，经过 A/D 转换变换成为二进制的数字信息；对于反映电网结构的断路器的位置信息，也可以方便的变换成二进制的数字信息。对于各种询问和控制命令信息，通过一定的编码规则，也能变换成一组二进制的数字信息。因而电网调度自动化系统中的一切信息，都可以变换成二进制的数字信息，用数字信号来传输。

本章讨论数字信号传输的基本概念，为进一步讨论调制解调器作必要的准备。

第一节 数字信号的表示方法

一、二元数字信号的表示

信息必须变换成物理信号后才能够传输。二元数字信息是数字信息的基本形式，因而二元数字信号也是数字信号的最基本的形式。远程数据传输都采用串行传输的方式，即发出的信息是一串二元数字信息序列，变换成一串二元数字信号后才能在信道上传输。

二元数字信息 d 只有两种状态 ($d=0$ 或 $d=1$)，因此可以用两种不同的脉冲信号波形（或数字信号波形）来表示，如图 1-1 所示。图 1-1(a) 中用三角形脉冲 $b_1(t)$ 代表数字信息“1”，用半圆形脉冲 $b_0(t)$ 代表数字信息“0”（实用上不可能采用这种形式的数字信号波形，这里仅用来形象地说明怎样用数字信号的波形来表示数字信息）；图 1-1(b) 用幅度为 A 的正极性矩形脉冲表示“1”，没有脉冲表示“0”；图 1-1(c) 中用幅度为 A 的正极性矩形脉冲表示“1”，用幅度为 A 的负极性矩形脉冲表示“0”。

设每个脉冲信号都占相同的时间 T_s ，则要发送的二元数字信息序列，可以用图 1-2 所示的二元数字信号序列来表示，其表达式为

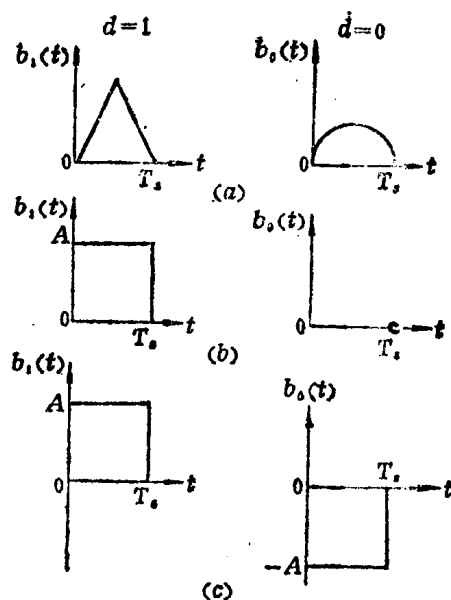


图 1-1 二元数字信号的波形

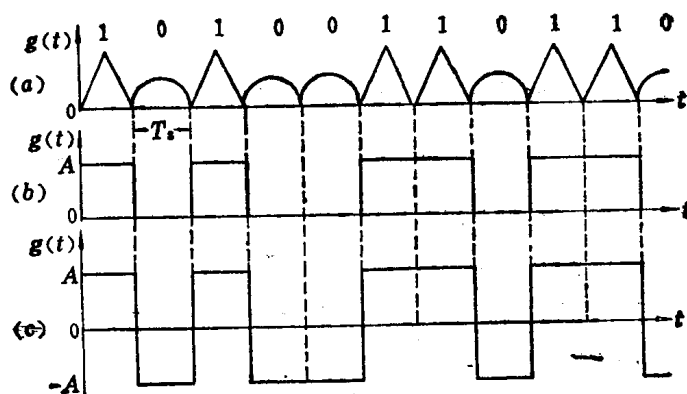


图 1-2 二元数字信号序列

$$g(t) = \sum_{i=0}^N [d_i \times b_1(t-iT_s) + (1-d_i) \times b_0(t-iT_s)] \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中 $b_1(t-iT_s)$ 和 $b_0(t-iT_s)$ 是延迟 i 个码元的脉冲波形。当二元数字信息 $d_i=1$ 时, 发送代表“1”的脉冲波形 $b_1(t-iT_s)$; 当 $d_i=0$ 时, 发送代表“0”的脉冲波形 $b_0(t-iT_s)$ 。在二元数字信号序列中, 每一位二元数字信号称一位码元, T_s 称为码元时间。

当采用图1-2 (b) 所示的数字信号序列时, 式 (1-1) 可以简化成如下的形式

$$g(t) = A \sum_{i=0}^N d_i \times b_1(t-iT_s) \quad (1-2)$$

当采用图1-2 (c) 所示的数字信号序列时, 因 $b_0(t-iT_s) = -b_1(t-iT_s)$, 故式 (1-1) 可以简化为

$$\begin{aligned} g(t) &= A \sum_{i=0}^N [d_i \times b_1(t-iT_s) - (1-d_i) \times b_1(t-iT_s)] \\ &= A \sum_{i=0}^N [(2d_i-1) \times b_1(t-iT_s)] \\ &= A \sum_{i=0}^N a_i \times b_1(t-iT_s) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 $a_i = 2d_i - 1$ 。当 $d_i=1$ 时, $a_i=1$; $d_i=0$ 时, $a_i=-1$ 。

图1-2 (b) 所示的数字信号称“单极性的非归零码”, 图1-2 (c) 所示的数字信号称“双极性的非归零码”。实用中还有一些其他形式的数字信号, 如图1-3所示。

图1-3 (a) 是单极性归零码, 用占空比为50%的正脉冲代表“1”, 没有脉冲代表“0”。图1-3 (b) 是双极性归零码, 用正极性占空比为50%的脉冲代表“1”, 用负极性占空比为50%的脉冲代表“0”。图1-3 (c) 是差分码 (按“1”变“0”不变的规则), 用电位变化代表“1”, 电位不变化代表“0”。图1-3 (d) 也是差分码 (但是按“0”变“1”不变的规则), 用电位变化代表“0”, 电位不变化代表“1”。差分码又叫相对码, 在数字调相系统中就使用这种码。还有一些其它形式的码型, 由于在电网远程数据传输系统中目前都没有采用, 所以不作介绍, 可以参阅其它书籍。

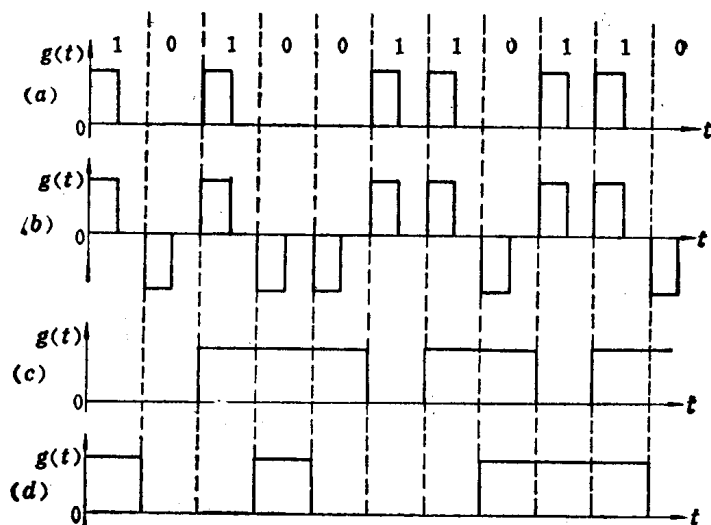


图 1-3 一些常用的数字信号序列

二、多元数字信号的表示

在数字信号传输系统中，为了提高信息传输的速率，常采用多元数字信号，如四元数字信号，八元数字信号等。

图1-4是一种四元数字信号的波形，它用四种不同幅度 ($+3A$, $+A$, $-A$, $-3A$) 的矩形脉冲信号，分别代表 3, 2, 1, 0 四元数字信息。

一般而言，对于 m 元数字信息，它有 m 个不同的状态，可以用 m 种不同幅度的矩形脉冲信号来表示。

为了进一步分析多元数字信息的特点，研究多元数字信息和二元数字信息之间的关系是很有意义的。在数据传输中有实用意义的多元制一般都满足 $m=2^l$ 的关系。当 $l=1$ 时即为二元制； $l=2$ 时即为四元制； $l=3$ 时即为八元制等等。根据以上的分析可知，多元

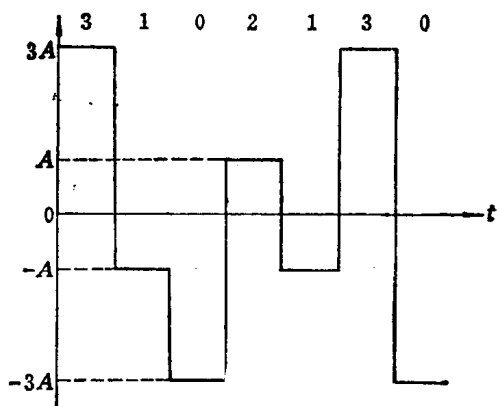


图 1-4 四元数字信号的波形

数字信息可以用 l 位二元数字信息的组合来表示，例如四元数字信息可以有 0, 1, 2, 3 四种状态，也可以用两位二元数字信息的组合 00、01、10、11 来表示。这种用两位二元数字信息组合成的码元称双比特码元。同理，八元数字信息有 0、1、2、3、4、5、6、7 八个状态，也可以用三位二元数字信息的组合 000、001、……、111 来表示，称 3 bit 码元。一般地说 2^l 元数字信息的状态可以用 l 位二元数字信息的组合来表示，称 l bit 码元。

反之， l 位二元数字信息的组合，可以用一位 2^l 元数字信息来表示。因而传送一位 2^l 元数字信号，相当于传送 l 位二元数字信号，因而传输多元数字信号时，信息传输的速率就提高了。

第二节 数字信号传输系统的模型

在数字信号传输系统中，影响信号传输的因素很多，我们通过数字信号传输系统的模型，来说明信息的传输过程以及影响传输系统性能的参数。

一、数字信号传输系统的组成

图1-5是数字信号传输系统的框图，下面分别介绍各个环节的作用。

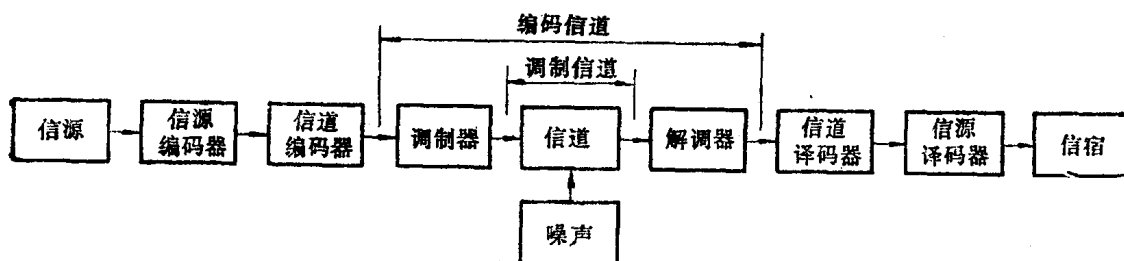


图 1-5 数字信号传输系统的框图

1. 信源

信源即数字信号传输系统中信息的来源。在电网调度自动化系统中信息的来源可能是电力系统本身的运行状态，也可能是发布命令的调度员。电力系统的运行状态，通过电压互感器、电流互感器以及各种变送器，变换成 $0 \sim 5\text{ V}$ 的直流电压，该电压值按比例地反映了运行的状态，我们往往把它看作信源的输出。

2. 信源编码器

在信源编码器中将信源的输出变换成二进制数字序列。当信源是变送器时， A/D 变换电路就是信源编码器；当信源是调度员时，操作控制台即为信源编码器。在信源编码器中还要考虑信息压缩等问题。

3. 信道编码器

信道编码器是在信源编码后得到的二进制数字序列的基础上，添加一些冗长的监督码元。通过信道编码以后的二进制数字序列就有一定的差错控制能力，可以实现检错或纠错。

4. 调制器

信道编码器输出的是基带数字信号。基带数字信号可以通过架空明线、对称通信电缆等信道直接传输，但一般只适用于传输距离较近的情况。为了增加传输距离或使信号能适合于电力线载波信道、微波信道的传输，需要将基带数字信号进行调制。常用的数字调制方式有数字调频和数字调相两类，这些内容是本书的主要讨论对象。

5. 信道

信道是信号传输时所经过的通道。对于信道可以有狭义的和广义的理解。

狭义信道：狭义信道分有线信道和无线信道两类。属于前者的有架空明线、对称电缆、同轴电缆等；后者一般指传输电磁波的自由空间。

广义信道：广义信道中包括调制信道和编码信道两类。

在图1-5中，从调制器的输出到解调器的输入之间的那一部分称为调制信道。在电力线载波通信系统中，它包括电力线载波机，结合设备、高压电力线等部分。在微波通信系统中，它包括终端机、微波高频机、天线和自由空间等部分。

在图1-5中，从信道编码器的输出到信道译码器输入之间的部分称为编码信道。

由于信道中存在着噪声和干扰，所以数字信号在传输的过程中会产生差错（误码），一般对于模拟信道可以用信噪比来反映信道的质量，而对于编码信道可以用误码率来反映信道的质量。

6. 解调器

解调器完成调制器相反的过程，即从数字调频信号或数字调相信号中恢复出基带数字信号。

7. 信道译码器

信道译码器对接收到的数字信息序列进行检错或纠错译码。

通过信道编码器和信道译码器可以对传输的数字信息实现差错控制，以减小误码的影响，所以也称之为抗干扰编码。

8. 信源译码器

信源译码器的作用是实现信源编码器的逆过程，即将数字信号变换成模拟信号。在电网调度自动化系统中，不一定包含信源译码器这一环节，因为接收到的数字信息可以直接送到计算机中进行处理。在某些情况下需要模拟量输出时， D/A 变换电路可以理解为信源译码器。

9. 信宿

信宿即信息接受者。在电网调度自动化系统中，调度模拟屏上的遥测、遥信显示，或CRT显示器等都可以看作信号的接收者。当然信息的最后接收者是调度所的值班调度员。

二、信道的基本特性

从不同的角度来研究信道，可以将信道分为调制信道（模拟信道）和编码信道（数字信道）两种。从调制器输出端到解调器输入端之间的信道称调制信道；从调制器输入端到解调器输出端之间的信道称编码信道。下面分别讨论这两种信道的特性以及它们之间的关系。

1. 调制信道

调制信道的性能主要是由信道的传输特性和噪声特性这两部分决定的。

信道的传输特性包括信道的衰减频率特性和相移频率特性两部分。

信道的衰减频率特性是信道的传输衰减量按频率分布的特性，可以用衰减频率特性曲线来表示。理想信道的衰减频率特性曲线是一条水平的直线，即各频率成份经过信道传输时有相同的衰减量，因而不会造成幅度失真。但实际信道的衰减频率特性曲线是不平坦的，即对不同的频率成份有不同的衰减量，信号通过这样的信道传输就会产生幅度失真。信道的衰减频率特性有时简单地用一个指标——信道的通带宽度来表示（简称信道的带宽），要求在信道的带宽内衰减量的波动要很小，直到信道带宽的边缘，衰减量变化不能超过

3 dB。在带外则衰减值可能很大。为了使信号在传输过程中不产生太大的失真，信号的带宽必须和信道的带宽相匹配。信号的带宽若超过信道的带宽，则一定有许多频率成份被过份的衰减而造成波形的失真；若信号的带宽小于信道的带宽，则进入解调器的噪声就会增大，也会对信号发生影响。因而信号带宽和信道带宽的匹配是很重要的。

信道的相移频率特性是指信号通过信道时相移量按频率分布的特性，可以用相移频率特性曲线表示。信号相位的滞后，实际上也就是信号在时间上发生了时延，相移 α 和时延 τ 之间的关系是 $\tau = \alpha / \omega$ ，式中 ω 为角频率，因而信道的相移频率特性也可以用相对应的时延频率特性表示。理想信道的相移频率特性是一条通过原点的直线，对应的时延频率特性是一条水平的直线，即各种频率成份都有相同的时延，因而不会造成失真。实际信道的相移频率特性不是一条通过原点的直线，因而时延频率特性也不是一条水平的直线，即对不同的频率成份有不同的时延，因而造成波形的失真，这种失真称相移（或时延）失真。一般要求在信道的带宽内，时延的相差不能太大，否则就要进行相位均衡，以补偿信道造成的相移（时延）失真。

信道的噪声特性是调制信道的另一个重要特性，它也直接影响数字信号的正确传输。噪声的来源是多种多样的，按其来源可分为无线电干扰、天电干扰、工业干扰和内部噪声干扰等。按其性质可以分为单频干扰、脉冲干扰和起伏噪声等几种。各种不同的信道，其噪声干扰的情况也不一样，例如对电力线载波信道，它的主要噪声干扰的来源有：高压电力线电晕放电引起的带正弦包络的起伏噪声干扰和电网操作等引起的脉冲干扰两种。噪声对信号传输的影响，并不是决定于噪声功率的绝对值，而是决定于信号功率和噪声功率的比值，即通常所指的信噪比。

所以调制信道的基本性能可以用信道带宽和信噪比两个指标来反映。

2. 编码信道

编码信道的性能既和调制信道的性能密切相关，又和调制解调器的性能有关。编码信道的性能主要可以用信息传输速率和误码率二个指标来表示。

信息传输速率既取决于调制信道所提供的带宽，又与调制解调器的制式有关，例如两相数字调相系统中信号的带宽 $\Delta F = 2F_s$ ；在一般二元数字调频系统中，信号的带宽 $\Delta F = 1.5F_s$ ；在二元窄带数字调频系统中，信号的带宽 $\Delta F = 1.17F_s$ ，式中 F_s 是信号速率。而信道提供的带宽必须和信号的带宽相匹配，当信道的带宽小于信号带宽时，信号中一定有某些频率成份受到较大的衰减，造成波形失真，引起码间干扰。

当调制解调器的体制已确定，信号带宽和信道带宽相匹配的条件下，编码信道的误码率主要决定于调制信道的信噪比。在不考虑码间干扰和只存在高斯白噪声的条件下，各种调制和解调方式的误码率和信噪比的关系都有理论分析的依据，在本书的第四章中将用曲线的方式给出这些结果，这里不作具体的介绍。

三、数据传输系统的主要技术指标

上面简单的介绍了调制信道和编码信道的基本特性，现在比较具体的介绍数据传输系统的主要技术指标。

1. 传输速率

传输速率是衡量系统传输能力的主要指标。它有以下几种不同的定义。

(1) 码元传输速率。携带数据信息的信号单元叫做码元。每秒钟通过信道传输的码元数称为码元传输速率(也称信号速率),记作 F_s ,单位是波特(Bd),简称波特率。

(2) 比特传输速率。每秒钟通过信道传输的信息量称为比特传输速率,记作 F_b ,单位是bit/s(比特/秒),简称比特率或信息速率。在二元数字信号“0”和“1”等概率出现的条件下,一位二进制码元所含的信息量为1bit,这时信息速率也就等于每秒钟传输的二进制码元数。

码元传输速率与比特速率具有不同的含义,不应混淆,但是它们之间有确定的关系。在等概率传输的条件下,对二元数字信号来说,每个码元的信息含量是1bit,因此,二进制的码元传输速率与比特传输速率在数值上是相等的。对于 M 进制来说,每个码元的信息含量为 $\log_2 M$ (bit)。因此,若码元传输速率为 F_s ,则相应的比特传输速率为

$$F_b = F_s \log_2 M$$

式中当 $M=2$ 时, $F_b=F_s$,即码元传输速率等于比特传输速率。

在远动数据传输系统中,常用的比特传输速率有300bit/s, 600bit/s和1200bit/s等几种。

2. 差错率

差错率是衡量数据传输质量的指标。

(1) 码元差错率。指在传输的码元总数中发生差错码元所占的比例,简称误码率,用 p_e 表示。

(2) 比特差错率。指在传输的比特总数中发生差错的比特所占的比例,简称误比特率,用 p_b 表示。若 $p_b=10^{-4}$,则意味着平均每传输10000bit的信息,即可能要发生1bit的差错。在二进制传输系统中码元差错率等于比特差错率。

在数据传输中,使用者最关心的是比特差错率。在不同的应用场合,对比特差错率的要求也不同,在电网远动数据传输系统中要求比特差错率小于 10^{-5} 。

3. 功率利用率与频带利用率

功率利用率用“保证误码率小于规定值所要求的最低归一化信噪比(每比特信号的能量 E_b 和噪声单边功率谱密度 N_0 的比值)”来衡量。要求的信噪比越低,功率利用率越高,反之则越低。

功率利用率和频带利用率与调制解调的方式有关。一般说来,在选择调制解调方式时应兼顾功率和频带利用率。如果在某些系统中,功率受限制的,则可以适当降低频带利用率来提高功率利用率。反之,若频带是受条件限制的,则应着重于提高频带利用率,而允许适当降低功率利用率,如SCJ-600窄带调频系统中,要在750Hz带宽的信道中传输600bit/s的信息,则必须要求有较高的信噪比,这就要保证频带利用率而适当降低功率利用率的一个例子。

第三节 基带传输系统概述

没有经过调制的信号称基带信号, 传输基带信号的系统称为基带传输系统。在运动数据传输技术中, 直接采用基带信号传输的情况并不多, 即传输的信号绝大多数是经过调制的信号。但研究基带信号传输是研究调制信号传输的基础, 了解基带传输系统, 有助于了解调制信号的传输。

一、基带传输系统的模型

图1-6是基带传输系统的框图。

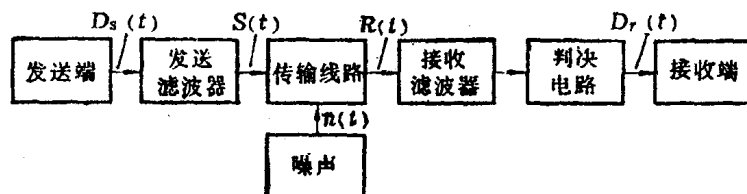


图 1-6 基带传输系统的框图

在发送端输出一个基带数字信号序列 $D_s(t)$, 在把基带信号送到传输线路之前, 通常用一个发送低通滤波器, 压缩信号的带宽, 得到发送信号 $S(t)$ 。信号在传输线路上传输时, 会受到各种噪声 $n(t)$ 的干扰, 在接收端的接受滤波器滤除带外的噪声和干扰, 得到接收信号 $R(t)$, 然后经判决电路恢复出一个接收数字信号序列 $D_r(t)$, 送到接收端。

当信号通过传输系统时会产生两种畸变: 一种是噪声和干扰引起的畸变, 另一种是由于信道的带宽受限造成的畸变。在两种畸变的影响下使信号产生失真。

判决电路的任务是要从失真的波形中尽可能正确地恢复发送波形。当然这个任务并不是始终能很好地完成的, 当波形失真非常严重时就可能被错误地判决, 因而产生误码。误码率的大小当然与波形失真的程度有关, 失真严重、误码率就高。

判决电路是基带传输系统中的一个重要环节。一个好的判决电路, 就可能在一定的畸变条件下, 使误码率减少到最低的限度。图1-7(a)是一种判决电路, 它包括比较和取样两部份。比较电路是由运算放大器构成的电压比较器。它将接收到的基带数字信号和设置的判决门限进行比较, 当输入信号电位高于判决门限时, 比较电路为正输出; 反之, 则为负输出。对于发送信息“0”、“1”等概率出现的二元对称信道中, 判决门限取信号高电位和低电位的平均值, 即

$$U_{判} = \frac{1}{2}(U_{高} + U_{低})$$

比较电路的输出接到取样电路。取样电路由D触发器构成, 其D端接运算放大器的输

出，CP端接定时取样脉冲。当D端为高电位时，取样脉冲将D触发器置“1”；D端为低电位时，取样脉冲将D触发器置“0”。D触发器的Q端即为判决电路的输出。

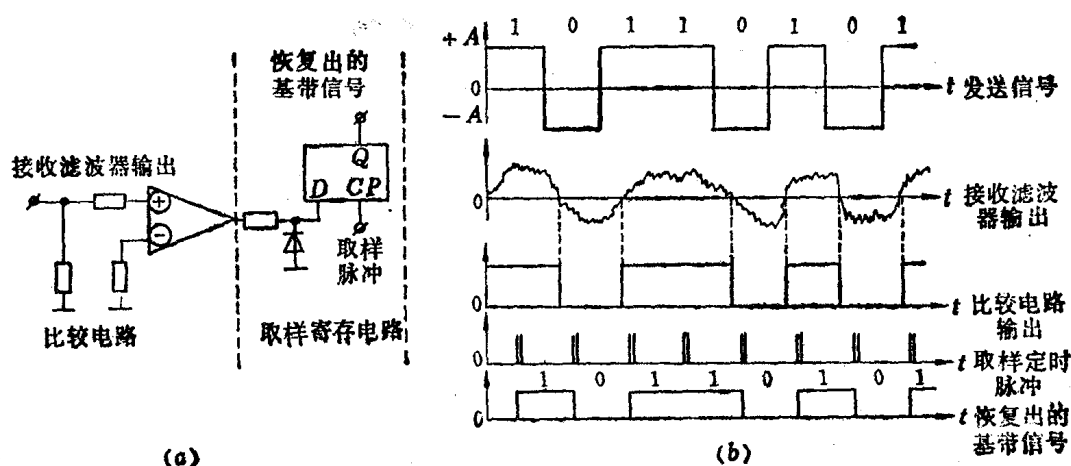


图 1-7 判决电路及其工作波形
(a)判决电路；(b)波形

图1-7(b)是判决电路的工作波形。由于比较电路的反相输入端接到判决门限为0V，所以当接收信号大于0V时，比较电路有正输出；接收信号小于0V时，比较电路有零输出（负输出被嵌位在0V附近）。

比较电路的输出接到取样寄存电路中触发器的D端，当取样脉冲到来时，就将比较结果寄存在触发器中，在触发器的Q端输出恢复的基带信号。由于取样脉冲的位置设置在接收码元的中间，所以恢复出的基带信号要延迟半个码元。

下面讨论噪声和干扰造成的波形失真以及频带受限造成的波形失真对误码率的影响。

二、噪声和干扰对误码率的影响

若信道中的噪声是高斯白噪声，当噪声叠加在信号上后使接收信号的波形产生失真，如图1-8所示。当噪声干扰较强时，接收信号在判决瞬间可能越过判决

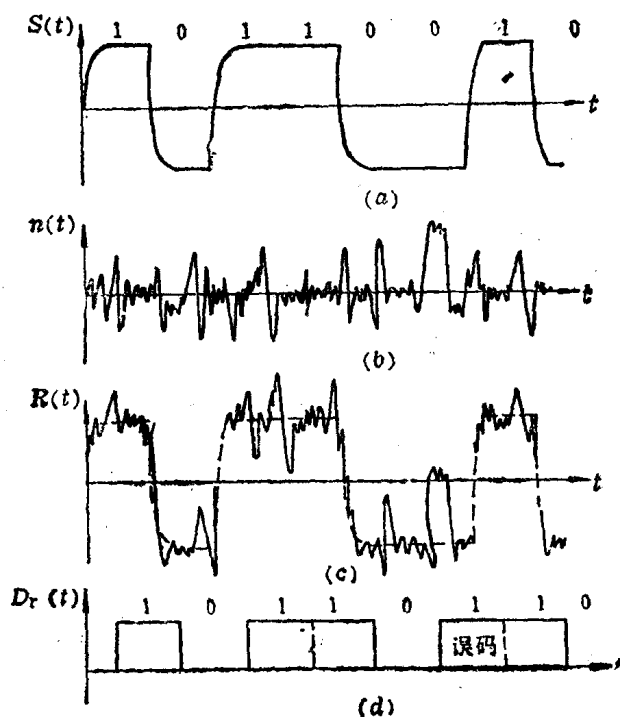


图 1-8 噪声引起的误码
(a)发送信号；(b)信道噪声；(c)接收信号；(d)判决结果

门限而造成误码，这就是噪声和误码关系的物理图象。

当信噪比较高时，由于噪声的相对值较小，所以越过判决门限的机会就少，因而误码率就较低；反之，当信噪比较低时，由于噪声的相对值较大，越过判决门限的机会就多，误码率就较高。

在不考虑码间干扰且假设噪声在高斯分布的条件下，误码率与信号峰值及噪声的均方根值的关系可用下式表示

$$p_e = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(A / \sqrt{2} \sigma_n \right) \right]$$

式中 p_e ——误码率；

A ——信号的峰值；

σ_n ——噪声的均方根值；

erf ——误差函数。

三、码间干扰和眼图

由于信道的带宽受限，基带信号通过信道传输时，总有一部份频率成份被滤除，因而造成信号的失真。这种失真使基带信号波形展宽，其产生的“尾巴”就会干扰相邻的码元，造成码间干扰。码间干扰的理论分析很复杂，一般采用实验方法来观测。我们将接收滤波器的输出接到示波器的Y轴输入，将位定时脉冲信号作为示波器的外触发同步信号，如图1-9(a)所示。这时示波器上观察到的图形很象人的眼睛，故称之为眼图。

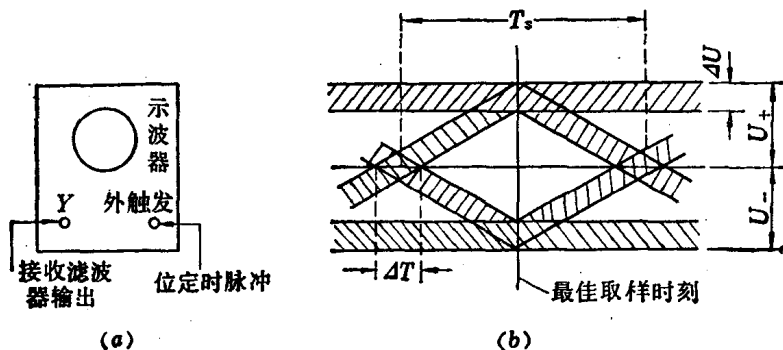


图 1-9 眼图观察法及眼图模型
(a)眼图观察法；(b)眼图模型

根据图1-9(b)可以规定几个衡量传输质量的参数。

(1)眼开启度 $\frac{U - 4U}{U}$ 。指在最佳取样时刻，眼的张开程度。无畸变眼图的眼开启度应该为100%。

(2)眼皮厚度 $\frac{4U}{U}$ 。指在最佳取样时刻，幅度的阴影部份和最大幅度之比，无畸变眼图的眼皮厚度应为零。

(3)交叉点发散度 $\frac{\Delta T}{T_s}$ 。指眼图过零交叉线的发散程度，无畸变眼图的交叉点发散度应等于零。

(4) 正、负极性不对称度 $\left| \frac{U_+ - U_-}{U_+ + U_-} \right|$ ，指在最佳取样时刻眼图正、负幅度的不对称程度，无畸变眼图的极性不对称程度应等于零。

下面具体讨论几种传输情况及其眼图。

1. 没有码间干扰和噪声时的眼图

假设信道具有理想低通滤波器的特性，其截止频率为 f_c ，当单位冲激脉冲信号以 $F_s = 2f_c$ 的速率通过信道时，其波形如图1-10所示。

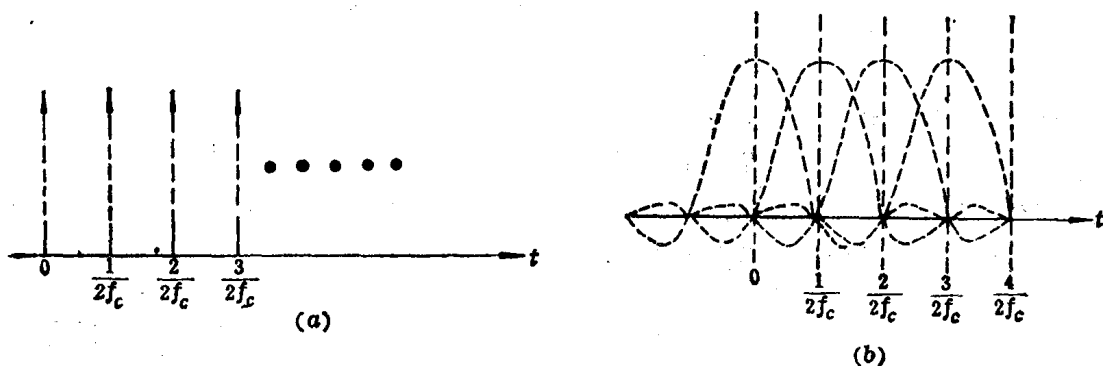


图 1-10 单位冲激函数通过理想低通滤波器的响应
(a)发送; (b)接收

从图中看到，当我们严格地按 $T = \frac{1}{2f_c}$ 的时间间隔向通道发送脉冲，而接收端以准确的时刻采样时，由于采样时刻只有所采样的那个响应处于最大值，前后相邻码元的响应的“尾巴”都处于过零点，故没有码间干扰。我们称 $T = \frac{1}{2f_c}$ 为奈奎斯特间隔。从上面的分析也可知，不产生码间干扰的极限传输速率为网络截止频率的两倍，这个极限速率也称为奈奎斯特速率，但这仅是一种理论界限，并无实用价值，实际传输的速率是低于这个界限的，这是因为：

- (1) 信道是不可能具有理想低通特性的，其截止频率也不可能那么准确；
- (2) 码速也不可能准确而稳定的保持截止频率的两倍；
- (3) 取样时刻也不可能那么准确。

因而前后脉冲在取样时刻产生干扰，影响正确的判决。

当双极性不归零的矩形脉冲序列通过频带受限的信道时，只要信道的带宽适当，这时虽然波形已失真，但码元之间的相互干扰较小，其波形如图1-11(a)所示，在观察其眼图时，将示波器的扫描周期调整到 T ，示波器上就显示出如图1-11(b)所示的眼图。

从图1-11(b)可以看出，这个图案就象一只睁开的眼睛，由于示波器的扫描与信号速率同步，又不存在码间干扰和噪声，所以示波器上显示的迹线很细又很清晰，在这种情况下眼图的开启度为100%，眼皮厚度为0。

2. 无噪声但存在码间干扰的眼图

在实际信道中，由于信道带宽受限，而传输的速率又较快，因而信号有较大的失真，