

第2章 数据通信基础

所要讲述的问题如下:

1. 数据通信的概念
2. 数据通信系统
3. 数据调制与编码
4. 多路复用技术
5. 数据交换方式
6. 传输介质
7. 差错检测
8. 差错控制

2.1.1 基本概念与术语

1. 数据、信息、信号、码元

数据(Data): 原始事实的集合, 涉及事物的形式。分模拟数据和数字数据——静态。

信息(Information): 按特定方式组织在一起的事实集合, 是数据所代表的内容及其解释, 包括实体、属性、数值三部分。更高层的抽象概念。

消息(message): 消息和信息并不完全是一回事。消息可以包含信息, 但消息不等于信息。

数据和信息的区别: 数据是独立的, 是尚未组织起来的事实集合, 信息则是按照一定要求以一定格式组织起来的数据, 凡经过加工处理或换算成人们想要得到的数据, 即可称为信息。

信号(Signal): 数据的电磁编码, 是数据在传输过程中的存在形式——动态。例如, 电压, 电流, 磁场强度等。

码元(Code): 在使用时间域(时域)的波形表示数字信号时, 代表不同离散数值的基本波形。

二进制中“1”和“0”就是**码元**。码元的序列就称为**码字**。如“1010101”就是码字。

在通信系统中, 要把数字数据或模拟数据从一个地方传到另一个地方总要借助于一定地物理信号, 如电磁波和光。而物理信号可以是**模拟信号**, 也可能是离散地**数字信号**。

2. 模拟数据、数字数据、模拟信号、数字信号

模拟数据: 在某区间产生**连续值**的数据。如, 声音和视像是连续变化的强度样本。大多数用传感器采集的数据是连续数值的, 如温度计和气压表。

数字数据: 在某区间产生**离散值**的数据。如, 文本或者字符串。他们通过编码技术, 将字符用比特序列来表示, 最常用的是国际基准编码(IRA, International Reference Alphabet)。

模拟信号: 在各种介质上传输的**连续变化的电磁波**。如双绞线、同轴电缆和光纤以及无线传播。音频信号是最常见的模拟信号, 它以声波的形式被人类直接感受到; 视频信号也是最常用的模拟信号, 它通过电视摄像机录制的原始镜头来说明这些数据的特点。

数字信号: 是一串**离散的、非连续性的电压脉冲序列**。如用一个正恒电压值代表二进制1, 一个负恒电压值代表二进制0。通常在有线介质上传输。

数据与信号的4种组合

3. 信道

信道: 传送信号的一条通路, 由线路及附

属设备组成。

单工、半双工、全双工

4. 带宽

信号带宽: 信号所占据的频率范围。如声音 300~3400Hz

信道带宽: 信道允许通过的频率范围。

5. 传输速率

数据传输速率(数据率、信息速率等): 单位时间内传输的二进制位数, 单位是位/秒(bps)。

码元传输速率: 单位时间内所传输的码元个数(信号个数), 单位是波特。

6. 信道容量

信道容量: 信道的最大数据率(极限参数)。

7. 抖动

11. 时域:

信号是**时间的函数**——给出了每一时刻信号的振幅值(连续或离散)

特例: 周期信号 $s(t+T)=s(t)$, T 为常量(周期)

例: 正弦波 $s(t)=A\sin(2\pi ft+\varphi)$

12. 频域: 信号是**频率的函数**——信号由多个频率组成

■ 其它频率都为某个频率的整数倍时, 最小的频率称为**基频**。

■ 整个信号的周期(频率)等于基频的周期(频率)。

■ 任何信号都可看成是由各种频率成分组成的, 每个频率成分都是正弦波。

13. 频谱: 信号的频率范围 (分布)。

正弦波合成

正弦波合成

14.信号强度

2.1.2 传输指标 (代表性指标)

1 带宽

“带宽”(bandwidth)本来是指信号具有的频带宽度,单位是赫(或千赫、兆赫、吉赫等)。

现在“带宽”是数字信道所能传送的“最高数据率”的同义语,单位是“比特每秒”,或 b/s (bit/s)。

更常用的带宽单位是

千比每秒,即 kb/s (10^3 b/s)

兆比每秒,即 Mb/s (10^6 b/s)

吉比每秒,即 Gb/s (10^9 b/s)

太比每秒,即 Tb/s (10^{12} b/s)

在时间轴上信号的宽度随带宽的增大而变窄。

2 时延(delay 或 latency)

分组从网络的一端传送到另一端所需的时间

发送时延

传播时延

处理时延

排队时延

总时延=传播时延+发送时延+处理时延+排队时延

发送时延(传输时延) 发送数据时,数据块从节点进入到传输媒体所需要的时间。

信道带宽 数据在信道上的发送速率。常称为数据在信道上的传输速率。

提高链路带宽减小了数据的发送时延。

传播时延 电磁波在信道中需要传播一定的

距离而花费的时间。

信号传输速率(即发送速率)和信号在信道上的传播速率是完全不同的概念。

铜线中传播速率 2.3×10^5 km/s

光纤中传播速率 2.0×10^5 km/s

容易产生的错误概念

■ 对于高速网络链路,提高的仅仅是数据的发送速率而不是比特在链路上的传播速率。

■ 提高链路带宽减小了数据的发送时延。与数据的传播时延无关。

处理时延 交换结点为存储转发而进行一些必要的处理所花费的时间。

排队时延 结点缓存队列中分组排队所经历的时延。

排队时延的长短往往取决于网络中当时的通信量。

例

1000Mbps 以太网上的两台主机要发送数据,其路径上有一个存储转发交换机,连续发送两个长度为 5000 比特的分组,假定每条链路的传播延迟为 $10\mu\text{s}$,并且交换机在接收完分组后立即开始转发分组,求总时延

往返时延 RTT (Round-Trip Time) 表示从发送端数据送到链路开始,到发送端收到来自接收端的确认(接收端收到数据后立即发送确认),总共经历的时延。

3 时延带宽积

链路能容纳的最多比特

链路的时延带宽积又称为以比特为单位的链路长度。

2.1.3 数字传输与模拟传输

数字传输: 传输数字信号的方法,与数字信号所代表的数据形式无关

模拟传输: 传输模拟信号的方法,与模拟信号所代表的数据形式无关

数字数据(二进制序列)

→编码为数字信号→数字传

输

数字数据(二进制序列)

→调制为模拟信号

(MODEM)→模拟传输

模拟数据(连续值)

→编码为数字信号(CODEC)

→数字传输

模拟数据(二进制序列)

→调制为模拟信号→模拟传

输

增大传输距离的方法

2.1.4 基带传输与频带传输

2.频带传输

解释

2.1.5 传输损害 (Transmission Impairments)

对模拟信号而言,损伤会降低信号的质量;对数字信号则会导致比特差错。

- 衰减和衰减失真 (Attenuation and attenuation distortion)
- 时延失真 (Delay distortion)
- 噪声 (Noise)

1. 衰减

结论 1: 衰减量是距离的函数

有线介质: 通常可用对数表示, 分贝/单位长度

无线介质: 非常复杂 (距离、大气环境)

结论 2: 衰减与频率有关: 频率越高, 衰减越严重

由于衰减的存在, 传输工程需要考虑三个方面:

- 接收到的信号必须有**足够的强度**, 这样接收器中的电路才能检测到信号。
- 信号电平必须保持**比噪声电平高**, 这样接收到的数据才没有差错。
- 频率越高衰减越严重。

解决方法: 前两个问题可注意信号强度并使用**放大器及转换器**可以解决。保持**高信噪比**。

最后一个问题通常采用**均衡技术**, 即利用加敏感线圈改变线路的某些电气特性, 使衰减的特性变得比较均匀(**高频补偿**)。

2. 时延失真

原因: 信号传播速度随频率改变, 中心频率传播速度快, 两端频率传播慢。

对高速、数字信号影响更大。

3. 噪声

在传送和接收之间的某个地方插入进来的不希望有的信号, 这种信号即为**噪声**。

噪声可分为四类:

- 热噪声(Thermal noise)
- 互调噪声(Intermodulation noise)
- 串扰(Crosstalk)
- 冲激噪声(Impulse noise)

热噪声 (白噪声) 是由导体内电子的热运动造成的, 它存在所有的电子设备和传输媒体中, 均匀分布在整個频率范围内, 是一个温度的函数。 $N=kTW$

其中 k 为玻尔兹曼常数 (1.3803×10^{-23}) J/°K, T 为温度, W 为带宽。

互调噪声 (调制噪声): 由于在发送器、接收器中存在非线性因素 (元器件发生了故障或使用了过强信号), 或者是传输系统受到干扰。

原因: 非线性设备产生。

串扰: 由于载有多路信号 (信道) 的相邻双绞线之间发生电耦合而产生互相干扰的现象。

以上三种噪声是可预测的。

冲激噪声: 是非连续的, 由不规则的脉冲或噪声尖峰组成, 这些噪声尖峰的持续时间短而振幅大。如雷电。难以预测, 主要影响数字信号。

2. 通信要素

无论采用什么方式通信, 必须具备三个基本要素:

信源、信息传输媒体、信宿。

3. 数据通信系统的模型

模型功能:

信源 (源站): 产生待传输的数据。

发送器: 格式转换、编码成适合传输的信号。

传输系统: 传输线路 (可能是一条线路, 也可能是一个网络系统)。

接收器: 接收信号并转换为设备可识别的数据格式。

信宿 (目的站): 接收数据并对其进行所需要的处理。

4. 传输系统 (信道) 的连接方式

- 点——点
- 分枝/交换
- 集线

5. 传输代码

- ASCII
- UNICODE

统一的字符编码标准, 采用双字节对字符进行编码

- BASE64(MIME)
- HZ
- GB
- BIG5

是台湾计算机界实行的汉字编码字符集。它包含了 420 个图形符号和 13070 个汉字 (不包含简化汉字)

6. 模拟通信系统和数字通信系统

模拟通信系统 是数据通信系统中处于 DCE 之间的信号为模拟信号的通信系统。信道的信号频谱通常比较窄, 信道的利用率比较高。但抗干扰能力差, 也不适应计算机通信的要求。

数字通信系统 是数据通信系统中处于 DCE 与 DTE 之间的信号为数字信号的通信系统。数字通信系统的抗干扰性明显优于模拟通信系统。该通信所占信道很宽。

2.2.2 数据传输速率

1.信道从两个不同的角度理解:

一种是将**传输媒体**和**完成各种形式的信号变换功能的设备**都包含在内, 称为**广义信道**。如调制信道、编码信道等。

另一种是**仅指传输媒体**(如双绞线、电缆、光纤、微波、短波等)本身, 这类信道称为**狭义信道**。通常总是把信道看作是以**信号传输媒体为基础的信号通路**。

2.信道可分为:

◆ **有线信道**: 一对导线构成一条有线信道。

特点: 能量相对集中在导线附近, 有较高的传输效率, 能量集中。

◆ **无线信道**: 发送方(信源)使用**高频发射机**和**定向天线**发射信号, 接收方(信宿)通过**接收天线**和**接收机**接收信号。

特点: 信号相对分散, **传输效率较低**, **安全性较差**。可分为长波、中波、短波、超短波和微波等多种, 能量发散。

信道可分为:

◆ **模拟信道**: 支持模拟信号传输。电话线、双绞线等。

特点: 传输一段距离之后, 信号**将会有所衰减**, 最终导致传输失真。为了支持长距离的信号传输, 模拟信道每隔一段距离, 应当安装**放大器**, 利用放大器使信道中的信号能量得到补充。

◆ **数字信道**: 支持数字信号传输(光纤等)。

特点: 对所有频率的信号都作**同等比**

例衰减的特点。长距离传输时, 数字信号也会有所衰减, 因此数字信道中常采用**类似放大器功能的中继器**来识别和还原数字信号。

3. 模拟信道和数字信道的通信质量

模拟信道的通信质量可用**失真**和**输出信噪比**来衡量。

信噪比 : $S/N=10\lg(\text{信号功率}/\text{噪声功率})$

信号与噪声功率之比表示**有用信号超过噪声电平的总量**(以分贝为单位)

S/N 越高, 意味着恢复后的信号质量越好, 也意味着可能使用较少的中继转发器。

3. 模拟信道和数字信道的通信质量

数字信道的通信质量可用**差错率**以及**差错序列的统计特性**来描述。

差错率/误码率: 信道上传输比特总数与其中出错比特数的比值。

$P_e = \text{出错比特数} / \text{传输比特数}$

信道的**差错率**与信号的**传输速率**或者**传输距离**成正比, 网络的**差错率**则主要取决于**信源至信宿之间的信道**的质量。

4.概念

信道带宽: 信道可以不失真地传输信号的**频率范围**。

信道容量: 因为信号的**失真和损坏**, 信道在单位时间内可以传输的最大信号量, 表示信道的**传输能力**。

数据传输速率(bps): 信道在单位时间内可以传输的**最大比特数**。信道容量和信道带宽具有**正比**的关系, 带宽越大, 容量越大。

信道容量与数据传输速率的区别: 前者表示信道的**最大数据传输速率**, 是信道传输数据能力的极限, 而后者是**实际的数据传输速率**。

数字信号通过实际的信道

失真不严重

失真严重

5.奈奎斯特准则

1924 年, 奈奎斯特(Nyquist)推导出在理想(无噪声)低通信道下的最高码元传输速率(容量):

理想低通信道下的最高码元传输速率 $= 2W \quad \text{Baud}$

其中: W 是理想低通信道的带宽, 单位为赫(Hz), Baud 是**波特**, 是码元传输速率的单位, 1 波特为每秒传送 1 个码元。

在带宽为 W (Hz) 的无噪声信道上传输信号, 假定每个信号取 M 个离散电平值, 则信道的**极限数据率**(比特率)为:

$2 \times W \times \log_2 M \quad (\text{bps})$

要强调以下两点

■ 实际的信道所能传输的最高码元速率, 要明显地低于奈氏准则给出上限数值。

■ 波特(Baud)和比特(bit)是两个不同的概念。

◆ 波特是码元传输的速率单位(每秒传多少个码元)。码元传输速率也称为调制速率、波形速率或符号速率。

◆ 比特是信息量的单位。

6.香农定理

香农(Shannon)用信息论的理论推导出了带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的极限、无差错

的信息传输速率。

信道的极限信息传输速率 C 可表达为

$$C = W \log_2(1+S/N) \text{ b/s}$$

W 为信道的带宽 (以 Hz 为单位);

S 为信道内所传信号的平均功率;

N 为信道内部的高斯噪声功率。

香农公式表明

■ 信道的带宽或信道中的信噪比**越大**, 则信息的极限传输速率就**越高**。

■ 只要信息传输速率**低于**信道的**极限**信息传输速率, 就一定可以找到某种办法来实现**无差错**的传输。

■ 若信道带宽 W 或信噪比 S/N **没有上限** (当然实际信道不可能是这样的), 则信道的极限信息传输速率 C 也就**没有上限**。

■ 实际信道上能够达到的信息传输速率要比香农的极限传输速率低不少。

奈氏准则和香农公式

在数据通信系统中的作用范围

[例 1] 已知信噪比为 30dB, 带宽为 3kHz, 求信道的最大数据传输速率。

$$\because 10\lg(S/N)=30 \quad \therefore S/N=10^{30/10}=1000$$

$$\therefore C=3k\log_2(1+1000)\approx 30k \text{ bps}$$

[例 2] 假设某个信道的频谱在 3MHz 到 4MHz 之间, 信噪比为 24 分贝, 求信道的最大数据传输速率。

$$\because W=4\text{MHz}-3\text{MHz}=1\text{MHz}, \quad 10\lg(S/N)=24,$$

$$\therefore S/N=10^{24/10}\approx 251$$

$$\therefore C=1M\log_2(1+251)\approx 8M \text{ bps} \quad (\text{这是理论上的})$$

极限)

用奈氏公式计算需要多少信号值?

$C=2W \log_2 M$ (其中 M 是离散信号的个数或电压值的个数)

$$8\times 10^6=2\times(10^6)\times\log_2 M \quad 4=\log_2 M \quad M=16$$

5. 数据率、带宽与信号质量

结论

2.2.3 同步控制方式

目的: 保证接收方在时间上与发送方取得同步, 以便能够**正确地识别和接收**发送方发来的数据。

使发、收双方确切知道每位的起始时刻和持续时间。

主要方式: 同步方式、异步方式

同步方式: 以某种方式将发送方的时钟信号也发送到接收方

异步方式: 接收方和发送方各自有时钟发生器, 但频率必须一致。

1. 同步传输方式: 以多个字符或者多个比特组合成的数据块为单位进行传输, **没有起始比特和停止比特**, 利用独特的**同步模式**来限定数据块, 达到同步接收的目的。为了防止发送器和接收器之间的偏差, 它们的**时钟**必须达到**某种程度的同步**。

对于数字信号, 通过**曼彻斯特编码或差分曼彻斯特编码**就可以实现。对于模拟信号, 载波频率本身就可以根据**载波的相位**来同步接收。

位同步: 接收方从接收到的信号中正确恢复原来数据信号。有插入导频法和自同步法

2. 异步传输方式:

异步通信或异步传输, 采用的是群同步技术, 即**群同步**。它是指字符可以**随机进行传递的一种传输**, 每个字符为 5 到 8 位表示, 每个字符前面放一个**起始位**, 后面跟一个**停止位**, 由于每个字符是独立的, 并可以以不同速率发送, 因此叫**异步传输**。

这种机制对于定时的要求**不是非常严格**。例如, 典型情况下字符以 8 比特为一个发送单位, 其中包括检验比特。如果接收器比发送器慢或者快了 5%, 那么第 8 个信息比特的取样位置会有 40% 的偏移, 但仍然被正确取样。

接收器与发送器定时误差太大, 会导致取样不正确, 这样会产生两种不同的误差。

① 接收到的后面比特样本是错误的。

② 此时的比特计数器也可能越界(可能第 8bit 误认为终止位)。

异步方式问题: 存在时间漂移(计时不准)

帧同步:

(1) 字符计数法

以一个特殊字符表示一帧的开始, 并以一个专门字段来表明帧内的数据字节数

接收方通过特殊字符确定帧的开始, 并从专门字段中获知随后跟随的数据字节数, 确定出帧的终止位置

存在问题: 如果计数字段在传输中出现差错, 接收方就无法判断所传输帧的结束位。也无法知道下一帧的开始, 使发送方和接收方无法同步。

(2)带字符填充的首尾界符法

在每一帧的头部用帧开始字符标记, 在帧的尾部, 用帧结束字符标记。

存在问题: 如果帧的首尾定界符出现在信息位中, 会造成错误接收, 因此, 在信息位中出现的定界符前出现一个转义字符用来区分。

(2)带字符填充的首尾界符法

存在问题: 如果帧的首尾定界符出现在信息位中, 会造成错误接收, 因此, 在信息位中出现的定界符前出现一个转义字符用来区分。零比特填充法

零比特填充法使一帧中两个 F 字段之间不会出现 6 个连续 1。

在发送端, 当一串比特流数据中有 5 个连续 1 时, 就立即填入一个 0。

在接收帧时, 先找到 F 字段以确定帧的边界。接着再对比特流进行扫描。每当发现 5 个连续 1 时, 就将其后的一个 0 删除, 以还原成原来的比特流。

零比特填充法

(4)物理编码违例法

将数据位“1”编码成高一低电平对, 数据位“0”编码成低—高电平对, 每一个数据位在中间都有一次跳变, 使接收方容易将帧的边界定位。高—高或低—低电平对在数据比特的编码中都是违例的, 可以借用这些违例编码的序列来定界帧的开始和结束。

无论是模拟数据还是数字数据都要编码成模拟信号或者数字信号。

1. 数字数据编码为数字信号

对接收器的要求:

①必须相当准确地了解一个比特的起止时间;

②接收器必须判断每个比特的信号电平是高还是低。

接收器在解释收到信号时与信噪比、数据率和带宽有关。

- 信噪比(S/N)增加, 则误码率减小;
- 数据率增加, 则误码率也增加。
- 增加带宽可以增加数据率;

数字信号编码格式的定义

(1) 不归零码

使用两个不同的电平来表示二进制数字(RS-232 编码)。特点是在一个比特周期内其电平恒定, 没有变化(不会回到零电平)。如没用电压的情况可以用来代表二进制的 0, 同时用一个恒定的正电平代表二进制的 1。

不归零电平(Nonreturn to Zero-Level, NRZ-L)是用一个负电平代表一个二进制数, 而正电平则用来代表另一个二进制数。

NRZI(Nonreturn to Zero, Invert on ones)(不归零 1 制)是 NRZ 的一种变型。编码形式是在一个比特的起始时刻看信号有或没有跳变, 0 代表在间隔的起始位置没有跳变, 1 代表在间隔的起始位置有跳变。

缺点: 同步能力差。

(2)多电平二进制

这种编码使用了多于两个的信号电平。双极性 AMI(Alternate Mark Inversion)和伪三进制。在双极性 AMI 中, 没有线路信号代表二进

制的 0, 而二进制的 1 由正脉冲或负脉冲表示。二进制 1 的脉冲值必须在正负两极之间不断交替。

优点:

① 如果 1 比特串很长的情况, 不会失去同步, 但 0 比特串仍然是个问题;

② 由于信号 1 的电平在正、负之间不断变换, 所以不存在净直流成分;

③ 脉冲交替变化的特点提供了一种简单的差错检测手段。

伪三进制码(pseudoternary)与双极性 AMI 正好相反, 没有信号代表二进制的 1, 而二进制的 0 由正脉冲或负脉冲表示。二进制 0 的脉冲值必须在正负两极之间不断交替。

双极性 AMI 在较长的 0 比特, 或者伪三进制码在较长的 1 比特仍然会出现问题。可采用插入附加的比特来强制信号的跳变。

(3) B8ZS (北美采用的远程通信编码体制)

双极性 8 零替换(B8ZS, Bipolar with 9-Zero Substitution)修正的方法是如果产生八个连续的 0, 并且产生之前的电压脉冲为正, 则八位编码为 000+—0—+。如果产生之前的电压脉冲为负, 则八位编码为 000—+0+—。

(4) HDB3 (日、欧采用的远程通信编码)

高密度双极性 3 零码(HDB3, High-Density Bipolar Zero)修正的方法是含有一个或两个脉冲的序列来替换 4 个零值的序列。替换方法见下表。

变换规则

连续 4 个或 4 个以上的 0 时, 每隔三个 0, 下一个 0 用 V 码(极性破坏点)取代

各 V 码必须进行极性交替

相邻 V 码间, 前 V 码后邻的原传号码应与之符合极性交替原则

要使 V 码前邻一定出现一个与之极性相同的码位, 若没有出现, 将 4 连 0 中第 1 个 0 用 B 码取代, 使 B 与它后邻的 V 码同极性

1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 0
0

1. V
V V

2. V₊
V₋ V₊

3. V₊ 1₋ 1₊ 1₋
V₋ V₊ 1₋ 1₊ 1₋ 1₊

4. 1₊ V₊ 1₋ 1₊ 1₋
V₋ B₊ V₊ 1₋ 1₊ 1₋ 1₊ B₋

(5) nBmB

(6) MLT-3 (多阶基带编码 3 或三阶基带编码)

(7) 曼彻斯特编码和差分曼彻斯特

曼彻斯特编码

一个比特时间一分为二

比特时间内 发生低电平到高电平的变化表示“1”

高电平到低电平的变化表示

“0”

差分曼彻斯特编码

一个比特时间一分为二, 比特时间中部发生电平变化, 表示的值依赖于前一比特的最终电平状态。

* 当前比特的前半部分电平 不同于 前一比特的最终电平状态 (即位间电平发生变化), 表示“0”

* 当前比特的前半部分电平 相同于 前一比特的最终电平状态 (即位间电平不发生变化), 表示“1”

曼彻斯特/差分曼彻斯特编码的优点

- 自同步
- 没有直流成分
- 可用于信号级差错检测

缺点: 效率较低, 适于近距离通信。

编码效率: 对曼彻斯特编码, 每比特时间有两次变化。每 200Mbaud 的信号率需要 100Mb/s 的数据率, 编码效率是 50%。对 4B/5B 编码, 每 4 比特组被编码成 5 比特, 用 125Mbaud 可得到 100Mb/s, 编码效率是 80%。

2. 数字数据调制为模拟信号

思想: 选取某一频率的正弦信号作为载波用以运载所要传送的数字数据。用待传送的数字数据改变载波的幅值、频率、或相位, 到达目的地后进行分离。

调制——把数字数据加到载波上去的过程

解调——从载波上取出数字数据的过程

调制技术有三种:

- 幅移键控(ASK)
- 频移键控(FSK)
- 相移键控(PSK)

(1) **幅移键控**(Amplitude-Shift Keying): 二进制的两个数值分别由同一频率载波信号的两个不同振幅值来表示。

ASK $s(t)=$

其中, 载波信号为 $A\cos(2\pi f_c t)$ 。幅移键控容易受突发的增益变化影响, 同时也是一种效率较低的调制技术。

特点: 简单, 抗干扰性能差。

定义四种振幅

两个概念

信息传输率 f_B

单位时间内 (每秒) 传输的二进制位数
波特率 (调制速率) B

单位时间内 (每秒) 线路状态变化数目
关系

n 位有 2^n 个组合, 如每一组合对应 2^n 个振幅中的一种, 则信息传输率为波特率的 n 倍

$f_B = B \log_2 M$ (M 为线路状态数 $M=2^n$)

(2) **频移键控**(Frequency-Shift Keying): 由载波频率附近的两个不同频率来表示二进制的两个值。设载波频率为 f_c , 调制后频率为 f_1, f_2 , 一般要求, $f_2 - f_c = f_c - f_1$

FSK $s(t)=$

例: 电话线上全双工传输声音信号, 这个带宽在 1700Hz 的地方被分割。在某个方向, 用于代表 1 和 0 的频率以 1170Hz 为中心, 各自向两侧偏移 100Hz。在另一个方向上, 用于代表 1 和 0 的频率以 2125Hz 为中心, 各自向两侧偏移 100Hz。

频率分别为: $1170 \pm 100\text{Hz}$, $2125 \pm 100\text{Hz}$

(3) 相移键控 (Phase-Shift Keying): 用待传数据改变载波的相位

绝对移相: 用两个绝对相位分别表示 0, 1

例如: 0° 表示 0, 180° 表示 1

相对移相: 用相位的变化表示 0, 1

例如: 有相位变化表示 1, 无相位变化表示 0

如果是多进制, 则相位差就不是 π

PSK $s(t) =$

正交移相键控 (QPSK): 每 90° 表示一种状态。

45° : 11

135° : 10

225° : 00

315° : 01

结果: 一个信号表示 2 位。

QPSK

每次调制 2 位, 定义 4 个相位

(4) QAM (正交振幅调制) (Quadrature Amplitude Modulation)

调幅、调相结合

把两个频率相同的模拟信号叠加在一起, 一个对应正弦函数, 一个对应余弦函数 (两函数相差 90°)

$C \sin x + D \cos x = A \sin(P+x)$

(4) QAM (正交振幅调制)

(4) 相位键控 + 幅值键控 (16)

(6) 性能 (调制信号的带宽)

3. 模拟数据编码为数字信号

一般的编码技术采用脉码调制 (PCM, Pulse Code Modulation) 和增量调制 (Delta Modulation)。

(1) 脉码调制

通过采样、量化和编码三部分组成。采样的标准按固定时间间隔,

以高出信号最大主频两倍的速率进行采样。

这样, 采样样本

就包含了原信号中的所有信息 (可恢复原始信号)。如话音数据的频率限制在 4000Hz 以下, 则采样以每秒采集 8000 个样本。

数字化过程

a 采样: 通过某种频率的取样脉冲将模拟信息的值取出, 变连续的模拟信息为离散信号。取样频率为: $f > 2f_m$ (f_m 为模拟信号的最高频率)。

也可以表示为 $f > 2B_m$ (B_m 为模拟信号的带宽)。采样频率高于信号最大主频率的两倍。

b 量化: 确定采样出的模拟信号的数值。通过规定一定的量化级, 对取样的离散值进行“取整”量化, 得到离散信号的具体数值, 最大级数为 N, 量化为整数时存在量化噪声 (误差), 量

化噪声为 $S/N = 6n - a$ (n 表示比特块, $0 < a < 1$, 取 1.8dB)

c 编码: 把相应的量化级别用一定位数的二进制数字表示, 并把编码以脉冲的形式送到信道上进行传输。用 $n = \log_2 N$ 位编码。

一般的情况下, PCM 机制使用称为非线性编码的技术进行优化。在信号振幅值较低时使用较多的量化值, 而在信号振幅值较高时使用较少的量化值, 这样信号的整体失真就可大幅度降低。

(2) 增量调制

增量调制 (DM, delta modulation) 用于提高 PCM 的性能或降低其复杂性的编码技术。其方法是输入的模拟信号由一个阶梯函数来近似, 这个函数在每个采样周期上升或下降一个步长值 (δ)。1 表示增加, 0 表示减少

与 PCM 相比, DM 的主要优势在于它的实现比较简单。

缺点: 不准确,

平坦的信号有误差。

(3) DPCM (差分 PCM)

用多位表示与前次采样的差值。

4. 模拟数据调制为模拟信号

为什么要调制:

- 为了实现传输的有效性, 可能需要较高的频谱。
- 通过调制就可以使用频分复用 (FDM) 技术, 充分利用带宽。
- 有效传输。

原理: 输入信号 $m(t)$ 与频率为 f_c 的载波信号合并产生合成信号 $s(t)$, 其带宽以 f_c 为中心。

调制技术: 调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)

(1) 调幅

调幅(AM, Amplitude Modulation)是输入信号 $m(t)$ 与频率为 f_c 的载波信号合并的过程, 产生信号 $s(t)$ 。

$$s(t)=[1+n_a x(t)]\cos 2\pi f_c t$$

其中, $\cos 2\pi f_c t$ 是**载波**; $x(t)$ 是调幅信号; n_a 调制指数, 是输入信号与载波信号的振幅比。输入信号 $m(t)=n_a x(t)$ 。

(2) 角度调制

调频(FM, frequency modulation)和调相(PM, phase modulation)是角度调制的特例。调制后的信号表达式如下:

$$s(t)=A_c \cos[2\pi f_c t + \Phi(t)]$$

对于**调相**, 相位与调制信号成正比: $\Phi(t)=n_p m(t)$, n_p 是调相系数;

对于**调频**, 相位的导数与调制信号成正比: $\Phi'(t)=n_f m(t)$, n_f 是调频系数。

波形图见下一页

5. 扩频通信

6. 扩频例子 (直接序列扩频)

目的: 使得多路信号共用一个信道,

方法: 多路信号组合在一条物理信道上传输, 充分利用信道容量。

原理: 当物理信道的可用带宽超过单个原始信号的带宽时, 将物理信道的总带宽“分割”成若干个和被传输的单个信号带宽相同或者略为宽一点的子信道, 并利用每个子信道传输一路信号。

关键点: 区分(识别)复用的多路信号。

1. 频分多路复用(FDM)

原理: 将不同的信号调制为不同的频率, 这些不同频率的信号同时同一条线路上传输。各路信号可一直使用分配的频段。

频分多路复用(FDM)

- 适用: 模拟传输
- 要求: 各频段不交叉、不连续
- 例子: 电话系统

12 路、4KHz/路 \rightarrow 带宽 48KHz, 60~108KHz, 基群

5 个基群 \rightarrow 超群

5 个超群 \rightarrow 主群 (CCITT, 300 路)

10 个超群 \rightarrow 主群 (Bell, 600 路)

15 个超群 \rightarrow 超主群 (900 路)

FDM 在广播和有线电视。6MHz 的传输带宽就可以满足电视信号的传输要求, 在 6MHz 带宽之内, 视像、色彩和音频信号的载波为频带的低边带之上 1.25MHz、4.799545MHz 以及 5.75MHz 的位置。而同轴电缆的带宽可达到 500MHz, 可同时运载数十路电视信号。

特殊形式: OFDM (正交频分多路复用)

- 选择相互之间正交的载波频率作子载波
- 单个用户的信息流被串/并变换为多个低速

率码流, 每个码流都用一个子载波发送

- 不用带通滤波器来分隔子载波, 而是通过快速傅立叶变换 (FFT)

时分复用

时分复用

时分多路复用 (TDM)

实用系统: 使用时分多路复用技术来支持语音信号的传输

语音的采样速率 8000Hz (一次/125 微秒)

北美的 T1 系统: 24 路语音信号复用、8bit/路、

一个周期: $24 \times 8 = 192 \text{bit} + 1$ (同步位), 125 微秒/周期, 传输速率: $193/125$ 微秒 = 1.544Mbps

欧洲的 E1 系统: 32 路、8bit/路、125 微秒/周期

传输速率: $32 \times 8/125$ 微秒 = 2.048Mbps

TDM 技术可以使得更多路信号复用到速率更高的信道上。例如: 4 路 T1 (1.544Mbps) 复用到 T2 (6.312Mbps), 7 路 T2 再复用到 T3 (44.736Mbps)

T2: 由 4 个 T1 组成, 6.312Mbps

T3: 由 7 个 T2 组成, 44.736Mbps

T4: 由 6 个 T3 组成, 274.176Mbps

3. 统计时分复用 (STDM)

也叫异步时分多路复用 (ATDM)

统计时分复用是一种改进的时分复用, 它能明显地提高信道地利用率。

4. 波分多路复用 (Wavelength Division Multiplexing)

波分多路复用实质上是利用了光具有不同的波长的特征。随着光纤技术的使用, 基于光信号传输的复用技术得到重视。

波分多路复用的原理: 不同的信号使用不同的波长同时在光纤上传输。

- **适用:** 光纤通信
- **问题:** 波长分配

5. 无线多址接入技术

目的: 在无线通信环境中, 为实现多个用户同时接入到共享信道的控制方式

主要技术: TDMA、FDMA、CDMA、OFDMA

(1) 时分多址接入 (TDMA)

原理: 各用户按时隙 (时间片) 确定接入时机

(2) 频分多址接入 (FDMA)

原理: 各用户使用不同的频率确定接入

(3) 码分复用 CDM (CDM, Code Division Multiple)

常用的名词是码分多址 CDMA。

(Code Division Multiple Access)。

各用户使用经过特殊挑选的不同码型, 因此彼此不会造成干扰。

这种系统发送的信号有很强的抗干扰能力, 其频谱类似于白噪声, 不易被敌人发现。

每一个比特时间划分为 m 个短的间隔, 称为码片(chip)。

(1) **原理:** 使用相同的频率但不同的码址, 得到不同的正交分量, 合成后传输。

(2) **适用:** 无线通信

(3) **问题:** 容量问题

码片序列 (chip sequence)

每个站被指派一个惟一的 m bit 码片序列。

如发送比特 1, 则发送自己的 m bit 码片序列。

如发送比特 0, 则发送该码片序列的二进制反码。

例如, S 站的 8 bit 码片序列是 00011011。

发送比特 1 时, 就发送序列 00011011,

发送比特 0 时, 就发送序列 11100100。

S 站的码片序列: $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$

CDMA 的重要特点

每个站分配的码片序列不仅必须各不相同, 并且还必须互相正交(orthogonal)。

在实用的系统中是使用伪随机码序列。

码片序列的正交关系

令向量 S 表示站 S 的码片向量, 令 T 表示其他任何站的码片向量。

两个不同站的码片序列正交, 就是向量 S 和 T 的规格化内积(inner product)都是 0:

任何一个码片向量和该码片向量自己的规格化内积都是 1。

一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1 。

A: $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$

B: $(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$

C: $(-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$

D: $(-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)$

发送码片序列表示数据位 1

发送码片序列的反表示数据位 0

若两个或两个以上的站点同时开始发送, 则双极型信号线性相加

接收方求收到序列与发送方码片序列的内积

(4) 正交频分多址接入 (OFDMA)

1. **原理:** 各用户以 OFDM 方式、使用不同的子载波频率接入。

2. OFDM/OFDMA 模式是 802.16m (4G) 的主要方式

1. 线(电)路交换:

原理: 在源节点和目的节点之间建立专用的通路。

过程: 建立连接、传输数据、断开连接。

特点:

- 连接是专用的。
- 数据直接传送。
- 电话网络例子。

缺点: 建立连接的时间太长, 在传递短报文时, 线路的利用率非常低。

线路交换的实现方法

① 空分交换: 资源重复使得同时建立多个连接

② 时分交换: TDM 技术

优点: 延迟小

缺点: 建立连接的时间太长, 在传递短报文时, 线路的利用率非常低; 不能充分利用线路容量; 不便于差错控制。

2. 报文交换

缺点

3. 分组交换 (包交换)

原理:

1. 与报文交换十分相似, 采用存储转发的方式传输。但它采用较短的固定格式信息单位--报文分组。

2. 它适合于交换机的主存储转发, 而不必访问外存, 与报文交换比, 能改善传输的接续时间和传送延迟时间。

3. 由于每个报文分组较短, 在传输中出错概率减少, 即使出错, 反馈重发的信息也比整个报文要少, 因而, 提高了传输效率;

4. 由于在信道上仅占一个报文分组的传输时间, 通信的并发度提高。可以采用分布式控制的自适应路由选择技术, 可根据通信量情况, 选择最佳的路由, 提高了通信效率, 又提高了通信可靠性。

优点:

- (1)缓冲区易于管理。
- (2)平均延迟更小, 平均缓冲区更少。
- (2)传输质量高。
- (3)可靠性高。
- (4)性能价格比高。
- (5)灵活性强。

分组交换实现的关键: 分组长度的选择, 分组越小, 冗余量(分组中的控制信息等)在整个分组中所占的比例越大, 最终将影响用户数据传输的效率; 分组越大, 数据传输出错的概率也越大, 增加重传的次數, 也影响用户数据传输的效率。因而, 分组长度取决于支持传输的线路质量。

X.25 分组交换网: 分组长度定义为 131 字节, (包括 128 字节的用户数据和 3 字节的控制信息)

以太网中: 分组长度定义为 1500 字节左右(较好的线路质量和较高的传输速率, 分组的长度可以略有增加)。

分组交换实现方式:

数据报包交换和虚电路包交换

①数据报包交换: 每个包作为一个独立的单位单独选择路径并传送。

②虚电路包交换: 第一个包申请路径, 其余的包经相同的路径到达目的地。

虚电路包交换又被称为面向连接的数据传输, 工作过程类似于线路交换, 但电路是虚拟的。

物理媒体被复用为多个子信道(称为逻辑信道 LC), 子信道的串接形成虚电路(VC), 利用不同的虚电路来支持不同的用户数据的传输。

虚电路包交换进行数据传输的过程:

■ 虚电路建立: 发送方发送含有地址信息的特定的控制信息块(如: 呼叫分组), 该信息块途经的每个中间结点根据当前的逻辑信道(LC)使用状况, 分配 LC, 并建立输入和输出 LC 映射表, 所有中间结点分配的 LC 的串接形成虚电路(VC)。

■ 数据传输: 站点发送的所有分组均沿着相同的 VC 传输, 分组的发收顺序完全相同; 分组中只带逻辑信道号, 而不带地址。

■ 虚电路释放: 数据传输完毕, 采用特定的控制信息块(如: 拆除分组), 释放该虚电路。通信的双方都可发起释放虚电路的动作。

虚电路传输举例:

两种类型的虚电路永久虚电路 PVC 和呼

叫虚电路 SVC

永久虚电路事先建立固定的链接, 占用固定的逻辑信道, 类似于存在一条专用电路, 任何时候, 站点之间都可以进行通信。

呼叫虚电路则根据需要, 动态建立和释放虚电路。

注意: 由于虚电路的建立和释放需要占用一定的时间, 因此虚电路方式并不适合站点之间具有频繁的、短小数据交换的场合(交互式通信)。

交换方式的比较

VCI 与 VPI

ATM 连接用信元首部中的两级标号来识别。

虚通路标识 VCI (Virtual Channel Identifier)

一个虚通路 VC 是在两个或两个以上的端点之间的一个运送 ATM 信元的通信通路。

虚通道标识符 VPI (Virtual Path Identifier)

一个虚通道 VP 包含有许多相同端点的虚通路 VC, 而这许多 VC 都使用同一个 VPI。

1. 双绞线

把两根互相绝缘的铜导线并排放在一起, 用规则的方法绞合

(twist) 起来就构成了双绞线。采用这种绞合起来的结构是为了

减少对相邻的导线的电磁干扰。(电话系统最多)

适用环境: 模拟传输和数字传输。

传输距离: 几到几十公里。

放大整型: 模拟信号用放大器, 数字信号用中继器。

双绞线分为: 屏蔽双绞线(STP, Shielded Twisted

Pair)
非屏蔽双绞线
(UTP, Unshielded Twist Pair)

两根绝缘导线绞合而成: $\Phi 0.015 \sim 0.056$ 英寸。

特性: 适于短距离传输模拟和数字信号。

连接方式: 多用于点——点连接。

双绞线和计算机之间的连接插头: RJ—45。

1991 年, 美国电子工业协会 EIA(Electronic Industries Association) 和电信工业协会 TIA (Telecommunications Industries Association) 发布了有关双绞线的标准, EIA/TIA-586A 和 EIA/TIA-586B, 标准规定了 7 个种类的 UTP 标准 (从 1 类线到 7 类线), 对传送数据来说, 最常用的 UTP 是 3 类线 (Category 3) 和 5 类线 (Category 5)。5 类线增加了绞合次数。

下表是 T568A 和 T568B 标准线序及对绞规则

2. 同轴电缆

① 物理结构

细同轴电缆和计算机之间的连接插头: T 型连接器。

② 传输特性: 频带宽, 适合传输模拟和数字信号。

③ 连接方式: 点——点、多点。

④ 同轴电缆分类

(1) 基带同轴电缆 (50 Ω)

细缆: 直径 0.2 英寸 (RG—58), 传输数字信号, 10Mbps, 理论长度 (单段) <300 米, 实际 <185 米, 最多 5 段。

粗缆: 直径 0.4 英寸 (RG—8), 传输数字

信号, 10Mbps, 理论长度 (单段) <500 米, 最多 5 段。

基带数字信号在计算机网络中常使用两种编码方法: 曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码。细缆以太网的连接图

(2) 宽带同轴电缆 (75 Ω)

划分为若干个独立的信道, 用于模拟信号的传输。用到放大器来放大模拟信号, 而放大器只能单向工作, 在宽带电缆的双工传输中, 一定要有数据发送和数据接收两条分开的数据通路。粗同轴电缆和计算机相接需要收发器的设备, 收发器的一端和计算机中的网卡 AUI 端口相接时需要 DIX 接头。

CATV 电缆

RG—59 (75 Ω): 用于电视系统用户端

RG—62 (93 Ω): 干线

3. 光纤

① 物理结构

光纤由三层组成: 导光纤维、隔离层和保护层。纤芯直径大约为 0.1mm 的塑胶或玻璃纤维构成, 具有把光封闭在其中并沿轴向进行传播的导波结构。

由两层折射率不同的材料及保护层组成。

有三个波长段: 0.85 μm 、1.3 μm 、1.55 μm

光纤与电导体构成的传输媒体最基本的差别是, 传输信息是光束, 而非电气信号。因此, 光纤传输的信号不受电磁的干扰。光纤的工作原理

② 光纤适用波长

③ 传输特性

④ 分类

光纤可分为传输点模数和折射率分布类两种: 传输点模数类分单模光纤 (SMF: Single Mode Fiber) 和多模光纤 (MMF: Multi Mode Fiber)。

(1) 单/多模光纤

单模光纤: 中心玻璃芯较细, 只能传一种模式的光。模间色散很小, 适用于远程通讯, 单模光纤对光源的谱宽和稳定性有较高的要求, 即谱宽要窄, 稳定性要好, 速度快。

多模光纤: 中心玻璃芯较粗, 可传多种模式的光。模间色散较大, 限制了传输数字信号的频率, 随距离的增加会更加严重导致逐渐展宽, 造成失真。多模光纤传输的距离就比较近, 速度慢, 一般只有几公里。

多模光纤与单模光纤

折射率分布类又分为跳变式光纤和渐变式光纤两类。

(1) 跳变式光纤

跳变式光纤中心芯到玻璃包层的折射率是突变的。其成本低, 模间色散高。如: 工控。单模光纤由于模间色散很小, 所以单模光纤都采用突变型。

(2) 渐变式光纤

渐变型光纤中心芯到玻璃包层的折射率是逐渐变小, 可使高模光按正弦形式传播, 这能减少模间色散, 提高光纤带宽, 增加传输距离, 但成本较高, 现在的多模光纤多为渐变型光纤,

也可以是跳变式光纤。

光纤与双绞线或同轴电缆之间特性上的区别:

- **容量更大:** 光纤在数百 Gb/s 的数据率传输几十千米的距离。同轴电缆在传输距离为 1 千米时的最大实际容量为几百 Mb/s, 双绞线在传输距离为 1 千米时只能达到几 Mb/s, 在只有几十米远时的容量也只能到达 100Mb/s 到 1Gb/s。
- **体积更小、重量更轻:** 光纤比同轴电缆或捆扎在一起的双绞线电缆要细得多、重量轻。
- **衰减更小:** 与同轴电缆和双绞线相比, 光纤的衰减大大降低, 而且在相当大的范围内保持恒定。
- **绝缘电磁场:** 光纤系统不受外部电磁场的影响, 因而这样的系统不怕诸如冲激噪声和串扰之类的干扰。
- **转发器的间隔更远:** 需要使用的转发器越少, 意味着费用越低。光纤中转发器可以相隔数百千米, 而同轴电缆和双绞线传输系统中通常每隔几百米就需要转发器。

总之: 光缆的电磁绝缘性能好, 信号衰变小, 频带较宽, 传输距离较大。

光纤速率表示

- 4. 无线传输介质(非导向传输媒体)
 - 包括: 无线电、微波、卫星、红外线
 - 特点:
- ◆ 使用电磁波或光波携带信息

- ◆ 无需物理连接
- ◆ 适用于长距离或不便布线的场合
- ◆ 易受干扰

无线电介质小结:

①物理性质: 无方向性

频率: 30MHz~1GHz

②传输距离: $d = 7.14 \times \sqrt{K h}$ (km)
K 为系数 (4/3), h 为天线高度 (m)

③损耗: $10 \log (4 \pi d / \lambda)^2$ (dB)

需要很多建立在高山顶上的微波中继塔进行“接力”, 才能传到远方。

卫星小结:

(4) 红外线

用途: 接收方检测信息在传输过程中是否出现差错。

结构: 检错码 = 信息字段 + 校验字段

特点: 校验字段的取值和信息字段密切相关; 校验字段越长, 编码的检错能力越强, 编码/解码设施越复杂, 附加的冗余信息在整个编码中所占的比例越大, 传输的有效成分越低。

传输顺序: 整体传输 => 信息字段在前, 校验字段在后。

1. 奇偶校验

方法: 在数据块的末尾附加奇偶校验位。

使用传输方式: 一般情况下, 偶校验用于同步传输, 而奇校验用于异步传输。

优点: 可检查(纠正)一位错误。

主要缺点: 当噪声将传输的信息破坏一个以上的比特时, 校验不安全。

2. 循环冗余校验

循环冗余码(Cyclic Redundancy Code) 是用得最为广泛且检错能力很强的一种检错码。

描述过程: 一个 k 比特的比特块, 即报文, 发送器会生成一个 n 比特的比特序列, 称为**帧检验序列(FCS)**, 使最后得到的具有 **k+n** 比特的帧可以被一些预定的数值**整除**。接收器用同样的数值对接收到的帧进行除法运算, 如其结果没有余数, 则认为没有差错。

可用三种方式来表示这一处理过程: **模 2 运算、多项式以及数字逻辑**。

(1) 模 2 运算

定义: $T = 2^n M + F$

其中: T = 要传输的(k+n)比特帧, $n < k$ 。

$M = k$ 比特报文, 就是 T 中

的前 k 比特。

$F = n$ 比特的 FCS, 就是 T 中

的后 n 比特。

$P = n+1$ 比特的模式, 它是预

定的除数。

通过将 M 乘以 2^n , 成功地将其向左移动了 n 比特, 并在得到的结果空位中填上零。加上 F 后就形成了 M 和 F 的连接串, 也就是 T。如果没有差错, 则 T/P 没有余数。

(2) 多项式

将所有的值表示成一个虚构变量 X 的多项式, 其系数均为二进制数。这些系数与二进制数值中的每一位相互对应。对于 $M = 110011$, 将其写为 $M(X) = X^5 + X^4 + X + 1$, 而当 $P = 11001$ 时, 有 $P(X) = X^4 + X^3 + 1$ 。运算操作依然是模 2 的。这时的 CRC 过程如下:

a.

b.

如果 $E(X)$ (差错模式) 能够被 $P(X)$ 整数, 那么这时的差错 $E(X)$ 将会检测不到。所以只要选择合适的 $P(X)$, 那么以下的差错都无法被 $P(X)$ 整除, 也就是说可以被检测出:

- 所有奇数个错误差错, 只要 $P(X)$ 含有因子 $(X+1)$, 即 1, 3, 5... 个错。
- 所有单位差错。
- 所有双位差错, 只要 $P(X)$ 至少具有 3 个 1。
- 任意突发差错, 当突发差错长度小于多项式除数的长度, 也就是小于或等于 FCS 的长度 ($\leq n$)。

循环冗余码 CRC

信息为 101001, $G(x)=x^3+x^2+1$, 求其传输的码字?

- ① $G(x)$ 的次数为 3, 则 $n=3$
- ② 求 $X^nK(x)$, 即在信息串后加 n 个 0
- ③ 求余数

有四个 $P(X)$ 的版本被广泛应用:

$$CRC-12 = X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X + 1$$

$$CRC-16 = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$$

$$CRC-CCITT = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

$CRC-12$ 主要用于 6 比特字符同步系统, 能检测出长度 12 位以内的突发差错。 $CRC-16$ 和 $CRC-CCITT$ 主要用于 8 比特字符同步系统, 能够检测出全部 1 位、2 位和奇数位的差错, 所有长度不大于 16 的突发错, 以及 99.998% 的 17 位突发错和 99.997% 的 18 位或更多位的

突发错。

$$CRC-32 = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$$

它可以检测出所有长度不大于 32 位的突发错, 对 33 位和大于 33 位突发错的检测能力分别达到 99.99999998% 和 99.99999995%

(3) 电路法 P-58(黄)

数据出现差错后, 使用某些手段发现某些差错并加以纠正。

差错控制方式:

1. 自动请求重发 (ARQ)

自动请求重发 ARQ (Automatic Repeat Request System) 又称检错重发。它是利用编码的方法在数据接收端检测差错, 当检测出差错后, 设法通知发送数据端重新发送数据, 直到无差错为止。

2. 向前纠错 (FEC)

向前纠错 FEC (Forward Error Correct)

是利用编码方法, 在接受数据端不仅对接收的数据进行检测, 当检测出错后能自动纠正差错。

3. 反馈检验法

反馈检验法是接受端将收到的信息码原封不动地发回发送端, 与原发送端中原发信息码相比较, 如发现错误, 发送端进行重发。

习题