

第2章 物理层

张瑞

ruizhang@shu.edu.cn

1

第2章 物理层

- ❖ 2.1 基本通信理论
- ❖ 2.2 传输介质
- ❖ 2.3 同步光纤网和同步数字系列
- ❖ 2.4 物理层协议举例

2

2.1 基本通信理论

- ❖ 2.1.1 数据通信的基本概念
- ❖ 2.1.2 数据通信中的几个指标
- ❖ 2.1.3 数字调制技术
- ❖ 2.1.4 多路复用技术
- ❖ 2.1.5 数字信号编码

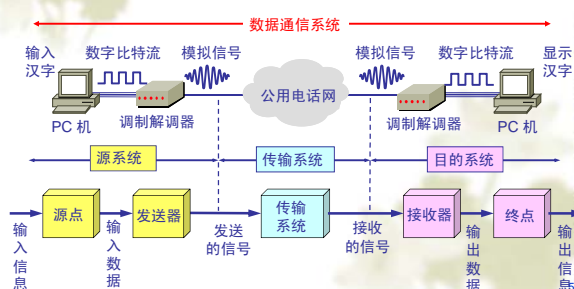
3

2.1.1 数据通信的基本概念

- ❖ 数据通信的基本概念
 - 通信的目的就是传递信息。一次通信中产生和发送信息的一端叫**信源**，接收信息的一端叫**信宿**。信源和信宿之间要有通信线路才能互相通信。按通信专家的行话来说，通信线路称为**信道**，所以信源和信宿之间的信息交换是通过信道进行的
- ❖ 数据通信系统的组成
 - 源系统(发送端、信源)
 - 传输系统
 - 目的系统(接收端、信宿)

4

数据通信系统的模型

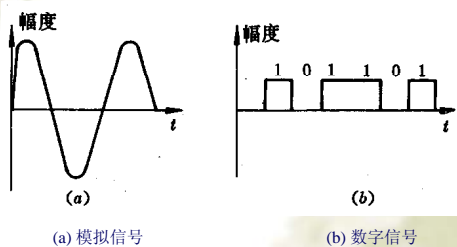


几个术语

- ❖ 数据在信道中以电信号的形式传送，电信号分为：模拟信号和数字信号
 - 模拟信号：是连续变化的电压或电流波形
 - 数字信号：是一系列表示“0”和“1”的电脉冲（码元）
- ❖ 数据(data)——运送信息的实体
- ❖ 信号(signal)——数据的电气的或电磁的表现
- ❖ “模拟的”(analogous)——连续变化的
- ❖ “数字的”(digital)——取值是离散数值
- ❖ 调制——把数字信号转换为模拟信号的过程
- ❖ 解调——把模拟信号转换为数字信号的过程

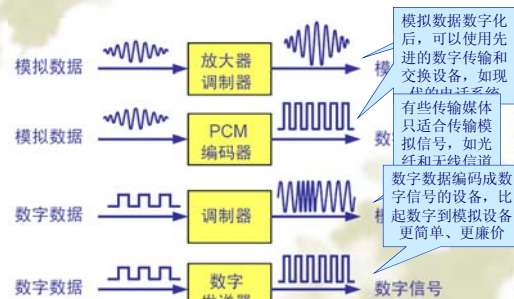
6

模拟信号与数字信号



7

模拟的和数字的数据、信号



8

2.1 基本通信理论

- ❖ 2.1.1 数据通信的基本概念
- ❖ 2.1.2 数据通信中的几个指标
- ❖ 2.1.3 数字调制技术
- ❖ 2.1.4 多路复用技术
- ❖ 2.1.5 数字信号编码

9

2.1.2 数据通信中的几个指标

- ❖ 信号传输速率
 - ❖ 数据传输速率
 - ❖ 信道的容量 \Rightarrow 信道的极限数据速率
 - ❖ 带宽
 - ❖ 时延
 - ❖ 误码率
- 无噪声
有噪声
- 网络的两个重要性能指标

10

信道的最高码元传输速率

- ❖ 任何实际的信道都不是理想的，在传输信号时会产生各种失真以及带来多种干扰
- ❖ 码元传输的速率越高，或信号传输的距离越远，在信道的输出端的波形的失真就越严重

11

数字信号通过实际的信道



12

信号的传输速率

- ❖ 每秒钟发送的码元数目，单位为波特（baud），信号传输速率又称为波特率。1 波特为每秒传送 1 个码元
- ❖ 信道的最高码元传输速率
 - ❧ 早在 1924 年，贝尔实验室的研究员亨利·奈奎斯特 (Harry Nyquist) 就推导出了低通信道最高码元传输速率
 - ❧ **理想低通信道**：信号的所有低频分量，只要频率不超过某个上限，都能够不失真地通过信道
 - ❧ **理想带通信道**：信号的频率在某个范围 $F_1 \sim F_2$ 之间的频率分量能够不失真地通过信道，其它分量不能通过
- ❖ 信道的带宽：信道所能传输的电信号的频率范围，单位为赫兹

13

奈氏(Nyquist)准则

理想低通信道的最高码元传输速率 = $2W$ Baud

W 是理想低通信道的带宽，单位为赫兹(Hz)



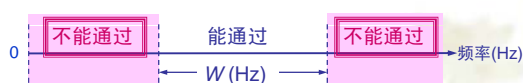
- ❖ 每赫带宽的理想低通信道的最高码元传输速率是每秒 2 个码元
- ❖ Baud 是**波特**，是**码元**传输速率的单位，1 波特为**每秒**传送 1 个码元

14

另一种形式的奈氏准则

理想带通特性信道的最高码元传输速率 = W Baud

W 是理想带通信道的带宽，单位为赫兹(Hz)



- ❖ 每赫带宽的理想带通信道的最高码元传输速率是每秒 1 个码元

15

奈氏准则之结论

- ❖ 在任何信道中，码元传输的速率是有上限的，传输速率超过此上限，就会出现严重的码间串扰的问题，使接收端对码元的判决（即识别）成为不可能

16

数据传输速率

- ❖ 数据传输速率：每秒钟能传输的二进制位数，单位比特/秒（bps），数据传输速率又称为比特率。
- ❖ 若码元的状态数为 2 时，可用一种状态表示“1”，另一种状态表示“0”。此时比特率=波特率（即每秒钟传输的二进制位数等于每秒钟传输的码元数）。
- ❖ 若码元的状态数为 4 时，四种状态分别表示为“00”，“01”，“10”，“11”。则一个码元可以携带两位二进制数，此时比特率=2*波特率。
- ❖ 一般情况：若码元状态数为 N ，则比特率和波特率的关系为：

$$S = B \log_2 N$$

17

要点

- ❖ 数据的传输速率“**比特/秒**”与码元的传输速率“**波特**”在数量上却有一定的关系。
- ❖ 若 1 个码元只携带 1 bit 的信息量，则“比特/秒”和“波特”在数值上相等。
- ❖ 若 1 个码元携带 n bit 的信息量，则 M Baud 的码元传输速率所对应的信息传输速率为 $M \times n$ b/s。

18

信道容量(1)

- ❖ 信道容量也称为信道的极限信息数据传输速率：表示信道传输数字信号的能力，是信道所能支持的数据速率的上限。
- ❖ 对于无噪声低通信道：若信道带宽为H，码元状态数为N。
 - ❖ 根据奈奎斯特定理： $B=2H$ (baud)
 - ❖ 信道的最大数据传输速率： $S=B*\text{Log}_2N$
 - ❖ 所以有： $S=2H*\text{Log}_2N$ (bps)
 - ❖ 无噪声信道N可以取任意值，所以无噪声信道的信道容量是无限的。

19

信道容量(2)

- ❖ 对于有噪声信道：N不能无限增长，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。若带宽为H的有噪声信道，信道容量为：
 - ❖ $C = H \log_2(1+S/N)$ (bps)
 - ❖ 其中：S为信号功率，N为噪声功率，S/N为信道的信噪比
 - ❖ 信噪比的单位为分贝(dB)，换算关系为：信噪比(dB) = $10\text{Log}_{10}(S/N)$

20

香农公式之结论

- ❖ 信道的带宽或信道中的信噪比越大，信息的极限传输速率就越高
- ❖ 香农公式指出了信息传输速率的上限
- ❖ 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

21

问题的提出

- ❖ 下载视频文件的快慢 → 带宽
- ❖ 球赛转播 → 时延
- ❖ 打电话听不清 → 误码率

22

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)。
 - ❖ 一个特定的信号常由不同的频率成分组成。
 - ❖ 信号的带宽指信号各种不同频率成份所占据的频率范围。
 - ❖ 例如：电话信号的标准带宽为3.1kHz，频率范围从300Hz到3.4kHz。
- ❖ 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)。

23

常用的带宽单位

- ❖ 更常用的带宽单位是(通信领域)
 - ❖ 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)
- ❖ 请注意：在计算机界， $K = 2^{10} = 1024$
 $M = 2^{20} = 1048576$, $G = 2^{30}$, $T = 2^{40}$ 。
- ❖ 传播速率的单位：m/s

24

传输速率vs传播速率

- ❖ 汽车进入高速公路需要经过收费站，收费站每5秒完成一辆车的收费，汽车离开收费站进入高速公路后的行驶速度是60km/h。
- ❖ **讨论**：以上场景中链路、带宽和传播速度分布指什么：
- ❖ 链路是高速公路，带宽是收费站的收费速度，传播速度是汽车的行驶速度。

25

讨论

- ❖ 在宽带线路上比特传播的~~快~~，在窄带线路上比特传播的慢。
- ❖ 宽带线路是指每秒有更多的比特从计算机注入到线路上。
- ❖ 宽带线路和窄带线路上比特的传播速率是一样的。
- ❖ “光纤信道传输速率高”是指向光纤信道发送数据的速率高，而不是指传播速率。

26

比喻：汽车运输

- ❖ 宽带和窄带线路：车速一样
- ❖ 宽带线路：车距缩短

宽带线路

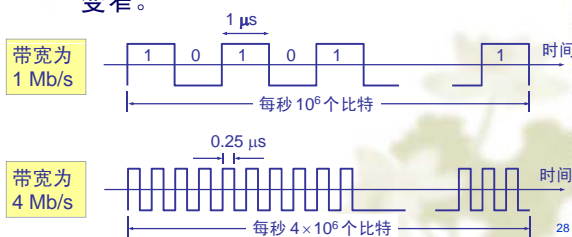
窄带线路

- ❖ 下载视频文件快的线路，带宽高。

27

数字信号流随时间的变化

- ❖ 在**时间轴**上信号的宽度随带宽的增大而变窄。



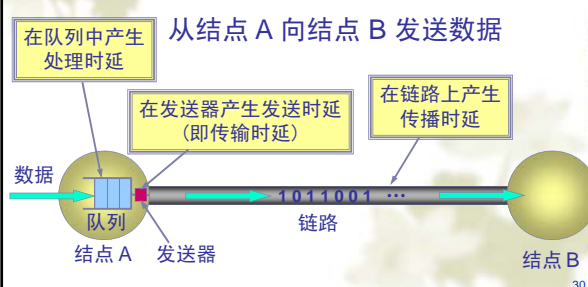
28

时延(delay 或 latency)

- ❖ **时延**：是指一个报文或分组从一个网络（或一条链路）的一端传送到另一端所需的时间。
- ❖ 时延分为：
 - 发送时延：结点发送数据时使数据块从结点到传输媒体
 - 传播时延：电磁波传播时延
 - 处理时延：排队，处理（存储、转发）等

29

三种时延所产生的地方



30

时延(delay 或 latency)

- ❖ **发送时延（传输时延）**：发送数据时，数据块从结点进入到传输媒体所需要的时间。即数据块第一个比特开始发送算起，到最后一个比特发送完毕所需的时间。
- ❖ **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**。

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据块长度 (比特)}}{\text{信道带宽 (比特/秒)}}$$

31

时延(delay 或 latency)

- ❖ **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。
 - 电磁波在自由空间的传播速率为光速， $3.0 \times 10^8 \text{ km/s}$ ，在铜线中为 $2.3 \times 10^8 \text{ km/s}$ ，光纤中为 $2.0 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。
- ❖ **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。

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度 (米)}}{\text{信号在信道上的传播速率 (米/秒)}}$$

32

时延(delay 或 latency)

- ❖ **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。
- ❖ 结点缓存队列中分组**排队**所经历的时延是处理时延中的重要组成部分。
- ❖ 处理时延的长短往往取决于网络中**当时的通信量**。
- ❖ 有时可用排队时延作为处理时延。

33

时延(delay 或 latency)

- ❖ 数据经历的总时延就是发送时延、传播时延和处理时延之和：

$$\text{总时延} = \text{发送时延} + \text{传播时延} + \text{处理时延}$$

34

注意点

- ❖ 对于高速网络链路，我们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。
- ❖ 例题

35

往返时延RTT

- ❖ **往返时延** RTT (Round-Trip Time) 表示从发送端发送数据开始，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。
- ❖ 复杂互联网中，RTT要包括各中间节点的处理时延和转发数据的发送时延。

36

误码率

- ❖ **误码率**：传输出错的码元数占传输总码元数的比例，是衡量数据通信系统在正常工作情况下传输可靠性的指标。
- ❖ 设传输总的码元数为 N ，传输出错的码元数为 N_e ，则误码率 P_e 为： $P_e = N_e / N$
- ❖ **误码率的应用**：误码率决定传输的数据单元的大小，信道的质量较差，误码率比较大则采用较小的数据单元传输。

37

误码率

- ❖ **例子**：假设误码率为 10^{-5} （即每传输100,000比特，发生1比特错误）；此时若数据单元为1000比特，则每发送100数据单元，发送一个错误，重传1000比特即可。此时若数据单元为10000比特，则每发送10个单元会发生1个错误，需要重传10000比特。
- ❖ 但并非数据单元越小越好，控制信息增加，额外开销增大。

38

2.1 基本通信理论

- ❖ 2.1.1 数据通信的基本概念
- ❖ 2.1.2 数据通信中的几个指标
- ❖ **2.1.3 数字调制技术**
- ❖ 2.1.4 多路复用技术
- ❖ 2.1.5 数字信号编码

39

2.1.3 数字调制技术

- ❖ 在计算机提供的二进制数字信号与电话网提供的模拟信号之间进行转换，这类技术统称为**调制/解调技术**。
- ❖ 连续波数字信号调制
 - ❖ **基带信号**：将数字信号1或0直接用两种不同的电压来表示，然后送到线路上去传输。
 - ❖ **宽带信号**：将基带信号进行调制后形成的频分复用模拟信号。

40

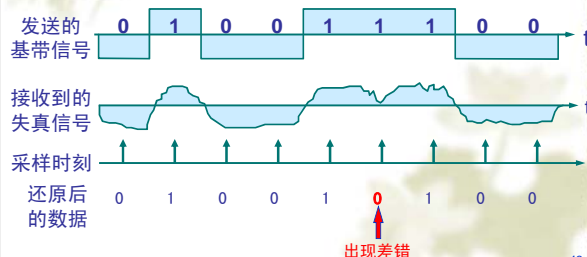
数字信号调制

- ❖ 电路中使用两种电平分别表示“1”和“0”，这种原始的电脉冲信号称为“**基带信号**”。
- ❖ 基带信号仅适合短距离的数据传输，在计算机的远程通信中，不能直接传输原始的电脉冲信号
- ❖ 需要Modem，在发送端将基带信号转换成适合传输的音频信号（**调制**）；在接收端再将音频信号转换成基带信号（**解调**）。

41

基带信号传输产生的误码

- ❖ 数据经过模拟传输系统后可能会出现差错。



42

调制解调器的作用

- ❖ **调制器(MODulator)**: 把要发送的数字信号转换为频率范围在 300~3400 Hz 之间的模拟信号, 以便在电话用户线上传送。
- ❖ **解调器(DEMODulator)**: 把电话用户线上传送来的模拟信号转换为数字信号。
- ❖ 调制器的主要作用就是个**波形变换器**, 它把基带数字信号的波形变换成适合于模拟信道传输的波形
- ❖ 解调器的作用就是个**波形识别器**, 它将经过调制器变换过的模拟信号恢复成原来的数字信号。
 - ⚡ 若识别不正确, 则产生误码。
 - ⚡ 在调制解调器中还要有差错检测和纠正的设施。

43

连续波数字信号调制

- ❖ **调制方法**: 选取一个适合于在线路上传输的正弦波作为载波, 让载波的某些特性(幅度、频率、相位)随基带信号的变化而变化。
- ❖ **基本调制方法**
 - ⚡ 振幅键控(ASK, Amplitude Shift Keying)
 - ⚡ 频移键控(FSK, Frequency Shift Keying)
 - ⚡ 相移键控(PSK, Phase Shift Keying)

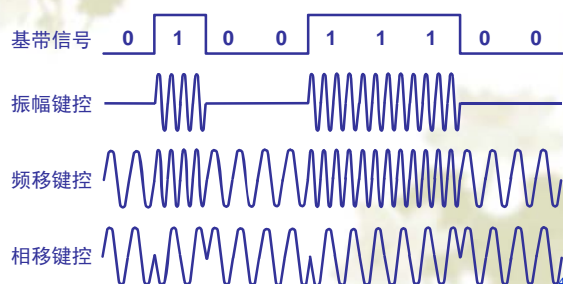
44

几种最基本的调制方法

- ❖ 调制就是进行波形变换(频谱变换)。
- ❖ 最基本的二进制调制方法有以下几种:
 - ⚡ **振幅键控**: 载波的振幅随基带数字信号而变化。
 - ⚡ **频移键控**: 载波的频率随基带数字信号而变化。
 - ⚡ **相移键控**: 载波的初始相位随基带数字信号而变化。

45

基带数字信号的几种调制方法



46

振幅键控(ASK)

- ❖ 用载波的**不同振幅**来表示不同的二进制值。
- ❖ 例如对应二进制0, 载波振幅为0(无载波); 对应二进制1, 载波振幅取1。
- ❖ 调幅技术实现起来简单, 但抗干扰性能差。

47

频移键控(FSK)

- ❖ 用载波频率附近的两个**不同频率**, 分别表示两个二进制数(0或1)。
- ❖ 例如对应二进制0的载波频率为 f_1 , 而对应二进制1的载波频率为 f_2 。
- ❖ 这种调制技术抗干扰性能好, 但占用带宽较大。

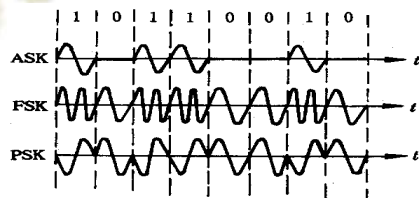
48

相移键控(PSK)

- ❖ 用载波的相位(绝对值或变化)来表示数据。
- ❖ 例如：0对应相位“0”，1对应相位180。
- ❖ 例如：发送的信号与前一个信号同相（相位不发生变化），则表示“0”；发送的信号与前一个信号反相（相位发生变化），则表示“1”。
- ❖ 注意：检测相位变化比检测相位值要容易。

49

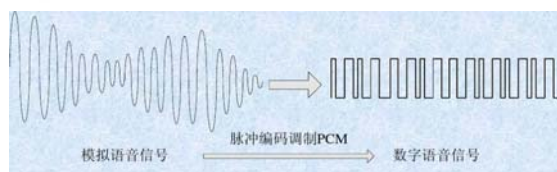
三种调制方式



50

脉冲编码调制PCM

典型应用：语音信号的数字化



51

脉冲编码调制PCM

模拟信号数字化：模拟信号转换成数字信号。
目的：为了信号在数字信道上传输。

PCM（脉冲编码调制）：Pulse Code Modulation

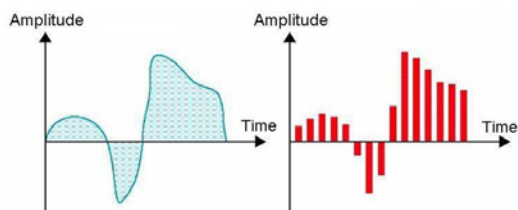
PCM将模拟信号转换为数字信号的过程：



52

采样

- ❖ **采样**：实现时间上的离散化。
- ❖ 每隔一定时间间隔，取模拟信号的当前值作为样本。该样本代表了模拟信号在某一时刻的瞬时值。



53

能否用抽样值代替原来的连续信号

?

如果抽样频率等于或大于信号最高频率的两倍，则可以由抽样恢复原信号。

采样周期

$$f_s = \frac{1}{T_s} > 2 f_{\max}$$

模拟信号的最高频率

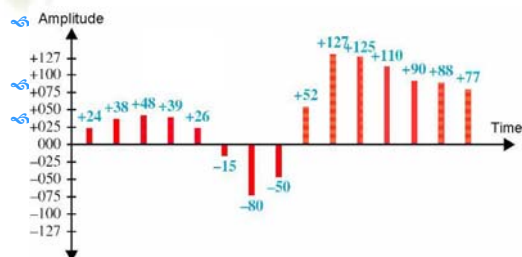
标准电话信号的最高频率3.4KHz，采样频率定位8KHz，即采样周期为125us。



数字信号的形成

通过抽样、量化后，信号不仅在时间上是离散的，而且在取值上也是离散的

- ❖ 量化：使采样值在取值上离散化。



55

编码

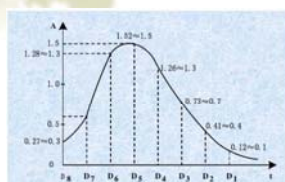
- ❖ 编码：将量化后的采样值用一定位数的二进制数码来表示。

+024	00011000	-015	10001111	+125	01111101
+038	00100110	-080	11010000	+110	01101110
+048	00110000	-050	10110010	+090	01011010
+039	00100111	+052	00110110	+088	01011000
+026	00011010	+127	01111111	+077	01001101

Sign bit
+ is 0 - is 1

56

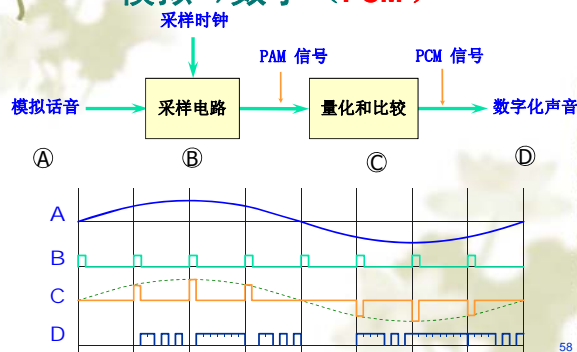
采样、量化、编码



样本	量化值	二进制编码	编码信号
D ₇	1	0001	
D ₆	4	0100	
D ₅	7	0111	
D ₄	13	1101	
D ₃	15	1111	
D ₂	13	1101	
D ₁	6	0110	
D ₀	3	0011	

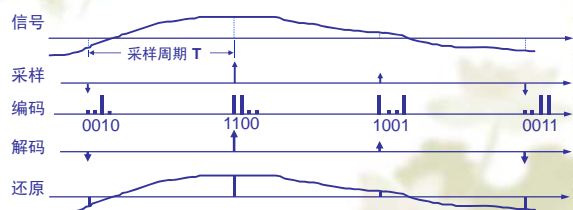
57

模拟→数字 (PCM)



58

PCM示意图



59

2.1 基本通信理论

- ❖ 2.1.1 数据通信的基本概念
- ❖ 2.1.2 数据通信中的几个指标
- ❖ 2.1.3 数字调制技术
- ❖ 2.1.4 多路复用技术
- ❖ 2.1.5 数字信号编码

60

❖ 道路共享

一条马路上只允许一辆车行驶？

❖ ADSL的原理

为什么电话线上可以传输电脑信号？



61

2.1.4 多路复用技术

一条物理线路上仅传输一路信号，资源浪费。采用多路复用，可以将多路信号组合在一条物理信道上进行传输，在接收端再将各路信号分离开来，提高通信线路的利用率。

❖ 多路复用技术：

- 频分多路复用
- 时分多路复用
- 波分多路复用
- 码分多路复用



图 2.1.4 多路复用技术

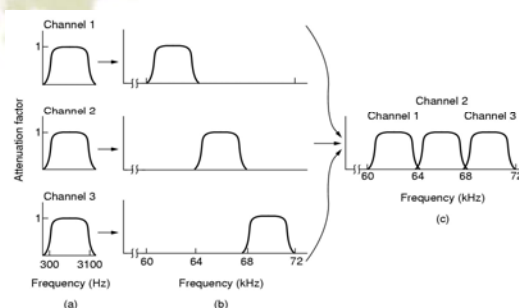
62

频分多路复用

- 频谱：信号的能量随频率的分布规律为信号的频谱。
- 信号的带宽：能量集中的区域为信号的带宽。
- 当信道的带宽等于或大于信号的带宽时，信号的频谱在传输过程中不会被改变。
- 频分多路复用（Frequency Division Multiplexing, FDM）：当信道的带宽大于各路信号的总带宽时，可以将信道分割成若干个子信道，每个子信道用来传输一路信号。
 - 要求：各路信号的频谱在传输过程中不互相重叠和干扰，采用频谱搬移技术。

63

FDM示意图



频分复用示意图



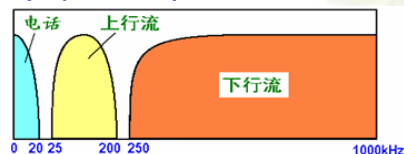
频分复用：“齐头并进”型复用

频分复用的所有用户在同样的时间占用不同的带宽资源

65

ADSL技术

- ADSL (非对称数字用户线路)
- 利用现有电话线(实际带宽1.1 MHz)实现宽带网络连接
- 非对称 (Asymmetric)的含义：下行速率大于上行



66

时分多路复用

- ❖ TDM(Time Division Multiplexing) 时隙, slot
 - 将使用信道的时间分成一个个时间片, 按一定规则将这些时间片分配给各路信号, 每一路信号在自己的时间片内独占整个信道进行传输。
 - 时间片的大小可以按一次传送一位, 一个字节或一个固定大小的数据块所需的时间来确定。
- ❖ 时分复用的所有用户是在不同的时间占用同样的频带宽度

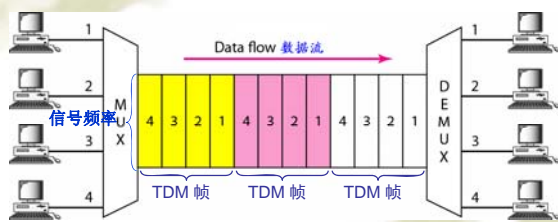
67

TDM类型

- ❖ 同步TDM (普通TDM)
 - 时间片的分配事先约定, 且固定不变。
 - 优点:** 控制简单, 接收设备根据预约的时间片分配方案, 将收到的数据分发到不同的输出线路上。
 - 缺点:** 当某个信号源没有数据时, 仍然占用时间片, 不能充分利用信道。
- ❖ 同步TDM将时间划分为一段段等长的TDM帧, 每个用户占用的时隙周期性出现。即: 信号源与时隙序号固定, 即**同步**。

68

时分复用示意图



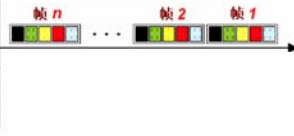
时分复用: “交替前进”型复用

时分复用的所有用户是在不同的时间占用同样的频带宽度

69

5路输入

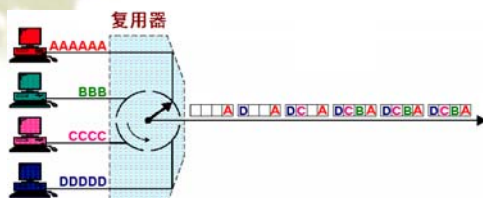
输入线路数: 5
每帧时间片数: 5



- 复用器将不同的输入交替组合成帧, 然后送入传输链路。
- 传输链路的容量必须能容纳所有的输入。如果上图中每路输入的带宽是9.6 kbps, 传输链路所需总带宽至少要48 kbps。

70

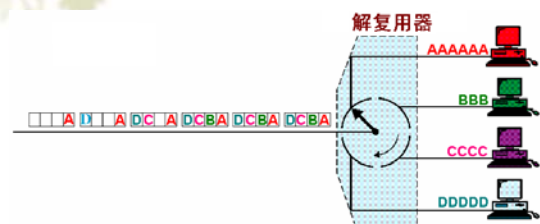
复用过程



使用同步时分复用系统传送计算机数据时, 由于计算机数据的突发性, 用户对分配到的子信道的**利用率不高**, 造成线路资源的浪费

71

分用过程



72

TDM类型

统计时分复用STDM（异步TDM）

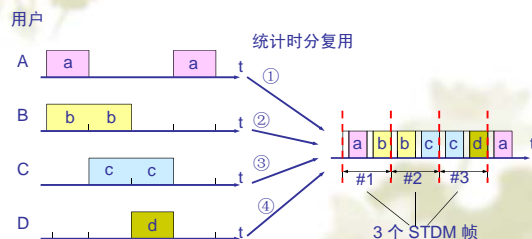
时间片按需分配，需要发送数据的信号源提出申请，才能获得时间片。即：公共信道的时隙实行“**按需分配**”，对那些需要传送信息或正在工作的终端（信号源）才分配时隙，可以使得所有时隙都能够饱满地得到使用，可以使得服务的终端数大于时隙的个数，提高信道的利用率。

特点：可以充分利用信道，但控制比较复杂。

例如下图：4个低速用户，每个TDM帧2个时隙，且每个时隙有相应的用户地址信息。

73

统计时分复用 STDM



74

TDM使用举例

电话系统中为了有效地利用传输线路，可将多个话路的PCM信号用时分复用 TDM (Time Division Multiplexing) 的方法装成时分复用帧，然后发送到线路上。

北美体制：用于北美和日本的电话系统T1信号 (1.544Mbps)。

欧洲体制：我国电信部门使用的E1传输系统 (2.048Mbps)。

75

T1电话系统

T1电话系统

每路电话的带宽为3400Hz，每秒8000次速率对模拟信号采样；

每个采样值被编码成7bit的数字信号，在加上1bit的控制信号；

24路信号组成一帧；

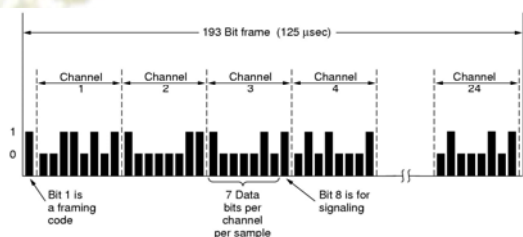
外加上1个帧同步比特；

一帧共有： $(7+1)*24+1=193\text{bit}$ ；

每秒传送8000帧，总数据速率为
 $8000*193=1.544\text{Mbps}$

76

T1信道



77

E1信道

一个时分复用帧共划分32个相等的时隙，即32路信号分时复用一条通道；

每个时隙8bit；

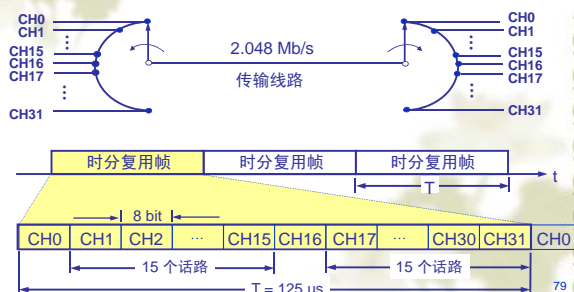
其中CH0作帧同步，CH16传送信令，剩下的30路传送语音。

采样频率为每秒8000次；

总的的数据速率为： $8*32*8000=2.048\text{Mbps}$

78

E1 的时分复用帧



TDM vs. TDMA

- ❖ TDM: Time Division Multiplex 时分多路复用
- ❖ TDMA: Time Division Multiple Access 时分多址接入
- ❖ 不同点在于，TDM把时隙用在multiplexing，TDMA把时隙用在multiple access
- ❖ TDM是一种多路复用技术，可出现在信道的任何一段，而TDMA是一种多址技术，是一种端到端的技术

The difference between TDM and TDMA is their main goal. TDM is a multiplexing technology that aims to use the same frequency to provide continuous flow of information in both directions. TDMA, on the other hand, is a multiplexing technology. Its main goal is to combine multiple signals into a single channel. This is used in cellular applications where hundreds of cellphone units may be connecting to a single base station.

For TDM, a certain time slot is always dedicated for a certain user even if the user isn't using it. An example of TDM is digital ground telephone networks (like ISDN).

For TDMA, after the user finishes using the time slot, the time slot is freed and can be used by another user. Usually time slots are dynamically assigned and the user may get a different time slot each time he accesses the network. An example of TDMA is GSM.

波分多路复用

- ❖ Wavelength Division Multiplexing, WDM
- ❖ 同FDM类似，主要用于光纤通信中；**波分复用就是光的频分复用**。
 - 不同的信号源使用不同频率（波长）的光波来传输数据，各路光经过一个棱镜（或衍射光栅），合成一个光束在光纤上传输；在接收端再将各路光波分开。
- ❖ **密集波分复用DWDM**（Dense WDM）：技术的发展一根光纤上复用的光载波信息路数越来越多，例如80或更多路数。

码分多路复用（CDMA）

- ❖ 常用的名词是码分多址 CDMA (Code Division Multiple Access)。
- ❖ 每个用户在**同样的时间**使用**同样的频带**进行通信。
- ❖ 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。
- ❖ 采用CDMA可提高语音质量、数据传输可靠性、增大通信系统容量（是GSM的4~5倍），降低手机的平均发射功率。
- ❖ 每一个比特时间划分为 m 个短的间隔，称为**码片(chip)**。m通常为64或128。

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)。
- ❖ 显然，如果 S 站发送信息的数据速率为 B b/s，由于每一个比特要转换成 m 比特的码片，因此，S 站实际的数据速率为 mB b/s，S 站所占用的频带带宽提高到原来的 m 倍。这就是扩频通信。

85

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：

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (2-3)$$

86

码片序列的正交关系举例

- ❖ 令向量 S 为(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)，向量 T 为(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)。
- ❖ 把向量 S 和 T 的各分量值代入(2-3)式就可看出这两个码片序列是正交的。

87

正交关系的另一个重要特性

- ❖ 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。

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

- ❖ 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1。

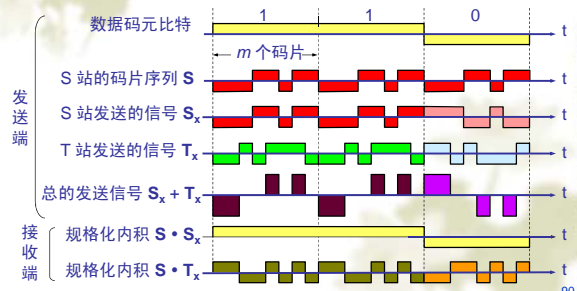
88

CDMA工作原理

- ❖ 每个站各自发送扩频信号，在接收端形成叠加的信号。
- ❖ 当接收站打算接收 S 站的信号时，就用 S 站的码片序列与收到的叠加信号求规格化内积：
 - ❗若 S 站有信号发送，则内积结果为 1(发送数据 1) 或 -1(发送数据 0)。
 - ❗若 S 站没有信号发送，则内积结果为 0。

89

CDMA 的工作原理



90

2.1 基本通信理论

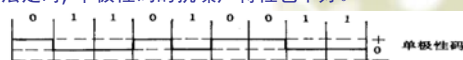
- ❖ 2.1.1 数据通信的基本概念
- ❖ 2.1.2 数据通信中的几个指标
- ❖ 2.1.3 数字调制技术
- ❖ 2.1.4 多路复用技术
- ❖ 2.1.5 数字信号编码

91

2.1.5 数字信号编码

❖ 单极性码

- 是指用电压的有或无来表示二进制数。
- 例如,在示意图中我们用+3 V表示二进制数字0, 而用0 V表示二进制数字1。
- 单极性码用在电传打字机(TTY)接口中以及PC机和TTY兼容的接口中, 这种代码需要单独的时钟信号配合定时, 否则当传送一长串0或1时, 发送机和接收机的时钟将无法定时, 单极性码的抗噪声特性也不好。

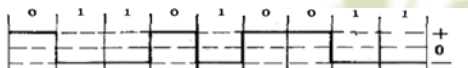


92

数字信号编码

❖ 双极型编码

- 用正、负电压分别表示两个二进制数0和1, 而且正和负的幅度相同。
- 例如在示意图中我们用+3 V表示二进制数字0, 而用-3 V表示二进制数字1, 这种代码的电平差比单极性码大, 因而抗干扰特性好, 但仍然需要另外的时钟信号。

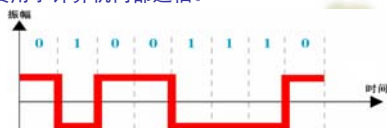


93

数字信号编码

❖ 不归零码

- 在一个码元的全部时间内, 电压保持恒定, 这种码又称为**全宽码**。
- 问题: 连续发送多个“1”码或“0”码时, 码元之间没有间隙, 不容易区分。
- 主要用于计算机内部通信。

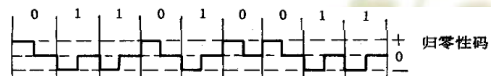


94

数字信号编码

❖ 归零码

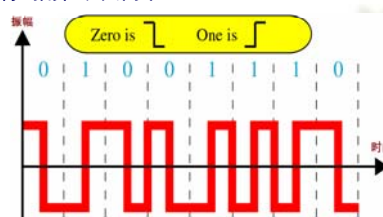
- 在一个码元的全部时间内, 非零电压的持续时间小于一个码元的时间。在一个码元的后半部分时间内, 电压总是归于零的。
- 好处: 双极型归零码解决了不归零码在连续发送“1”码或“0”码不容易区分的问题。



95

曼彻斯特编码

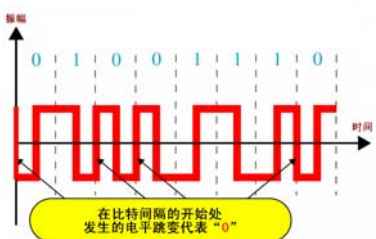
- 每位中间有一个电平跳变, 从低到高的跳变表示“1”, 从高到低的跳变表示“0”。
- 曼彻斯特码用在以太网中。



96

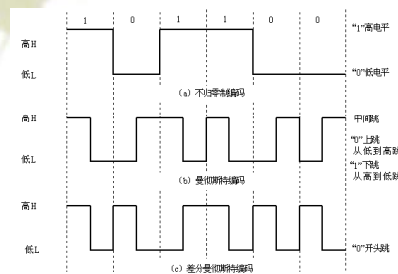
差分曼彻斯特编码

- ❖ 每位的中间有一个跳变，但它不是用这个跳变来表示数据的，而是利用每个码元的开始时有无跳变来表示“0”或“1”。
- ❖ 有跳变表示“0”，没有跳变表示“1”。
- ❖ 差分曼彻斯特编码用在令牌环网中。



97

曼彻斯特与差分曼彻斯特编码



98

第2章 物理层

- ❖ 2.1 基本通信理论
- ❖ 2.2 传输介质
- ❖ 2.3 同步光纤网和同步数字系列
- ❖ 2.4 物理层协议举例

99

传输介质

- ❖ 1. 导向性传输媒体（电磁波被导向沿着固体媒体传播）
 - ❖ 双绞线
 - ❖ 屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)
 - ❖ 无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)
 - ❖ 同轴电缆
 - ❖ 50 Ω 同轴电缆
 - ❖ 75 Ω 同轴电缆
 - ❖ 光缆
- ❖ 2. 非导向性传输媒体（自由空间传播、无线传输）

100

双绞线

- ❖ 由两根按螺旋状扭合（减少线对之间的电磁干扰）在一起的绝缘铜导线组成；
- ❖ 既可用于模拟传输，也可用于数字传输；
- ❖ 带宽依赖于线的粗细和传输距离；
- ❖ 非屏蔽双绞线UTP (Unshielded Twisted Pair)，屏蔽双绞线STP
 - ❖ STP分为3类和5类，5类的STP在100米内可达155Mb/s；
 - ❖ 目前用的比较多的是5类和超5类UTP。6类UTP可达250Mb/s，7类可达600Mb/s。

101

双绞线示意图



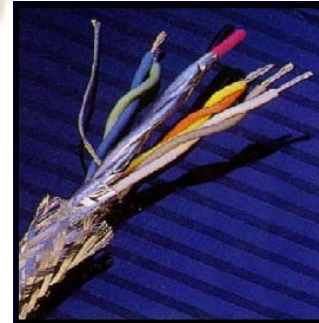
102

常用的双绞线的类别

双绞线类别	带宽	典型应用
3	16 MHz	低速网络；模拟电话
4	20 MHz	16Mbps令牌环局域网；短距离的10BASE-T以太网
5	100 MHz	10BASE-T以太网；某些100BASE-T快速以太网
5E（超5类）	100 MHz	100BASE-T快速以太网；某些1000BASE-T千兆以太网
6	250 MHz	1000BASE-T千兆以太网；ATM网络
7	600 MHz	屏蔽双绞线，可能用于今后的万兆以太网

103

STP



104

双绞线制作

- ❖ 布线标准
 - 美国电子工业协会和电信工业协会联合发布标准EIA/TIA568A和EIA/TIA568B，但一般使用TIA568B标准。
- ❖ UTP线缆组成
 - 内部4对线组成，一根是纯色，另一根是白色上有相应的色点；如橙和橙白，绿和绿白，蓝和蓝白，棕和棕白。



105

UTP线缆制作

- ❖ 线缆类型
 - 直通线：连接两种不同的设备，计算机与交换机、计算机与HUB、交换机与路由器。
 - 交叉线：同种设备连接。计算机间、交换机间、路由器间。但路由器与计算机间、计算机与光纤收发器间也用交叉线。
 - 反转线：用于交换机或路由器的控制端口与计算机的连接。计算机作为这些被控设备的超级终端。

106

直通线的排列方式

引脚	1	2	3	4	5	6	7	8
端A	白橙	橙	白绿	蓝	白蓝	绿	白棕	棕
端B	白橙	橙	白绿	蓝	白蓝	绿	白棕	棕

- ❖ 引脚排列：水晶头朝正前方，卡子面朝下，最左边为第1引脚，最右边为第8引脚。

107

Connection standard: 568A/568B

568B:



交叉线的排列方式

引脚	1	2	3	4	5	6	7	8
端A	白橙	橙	白绿	蓝	白蓝	绿	白棕	棕
端B	白绿	绿	白橙	蓝	白蓝	橙	白棕	棕

❖ 引脚排列：水晶头朝正前方，卡子面朝下，最左边为第1引脚，最右边为第8引脚。

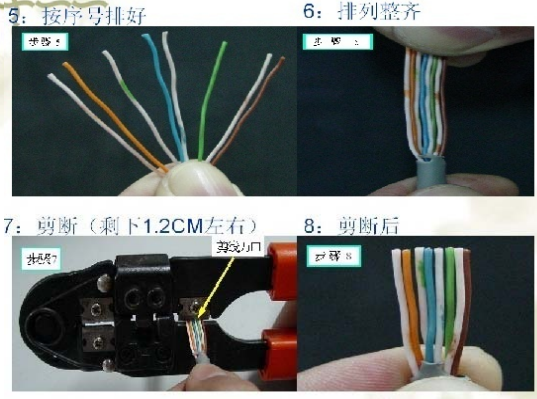
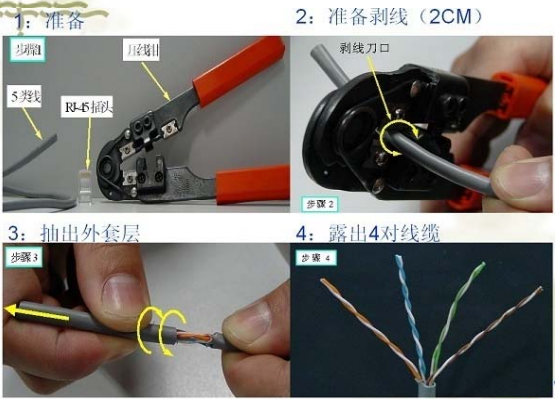
109

反转线的排列方式

引脚	1	2	3	4	5	6	7	8
端A	白橙	橙	白绿	蓝	白蓝	绿	白棕	棕
端B	棕	白棕	绿	白蓝	蓝	白绿	橙	白橙

❖ 引脚排列：水晶头朝正前方，卡子面朝下，最左边为第1引脚，最右边为第8引脚。

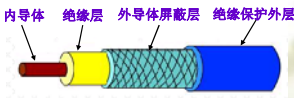
110



67
13

同轴电缆

- ❖ 同轴电缆：由内导体铜质芯线、绝缘层、网状编织的外导体屏蔽层以及保护塑料外层组成。外导体屏蔽层具有很好的抗干扰特性。
- ❖ 与计算机的连接要用T型分接头。



114



同轴电缆

按照特性阻抗的不同，分为：

基带同轴电缆

50欧姆，用于数字传输；

分粗缆和细缆两种；

以10Mb/s可将基带数字信号，粗缆传送500米，细缆传送180米。

宽带同轴电缆

75欧姆，用于模拟传输。

Cable TV技术，300MHz或450MHz，采用FDM技术将信道分割成多个子信道，每个子信道传送一路电视信号。

用于城域网，如有线通（Cable MODEM）

116

光纤

光纤由能传导光波的石英玻璃纤维和保护层构成，纤芯很细直径只有8至100um，纤芯和包层具有不同的折射系数

光纤特性

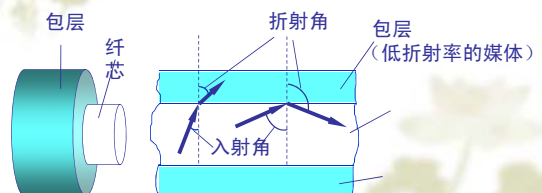
光线从高折射率的媒体射向低折射率的媒体时，其折射角大于入射角。

若入射角足够大，出现全反射；

包层较纤芯有较低的折射率，入射角足够大光线碰到包层时会折射回纤芯。

117

光线在光纤中的折射



118

多模光纤与单模光纤

多模光纤

只要从纤芯射到纤芯表面的入射角大于某一个临界角度，就会产生全反射。这样可以存在多条不同角度入射的光线在一条光纤中传输，这种光纤为~。

传输中光脉冲会逐渐展宽，造成失真，适合短距离传输。

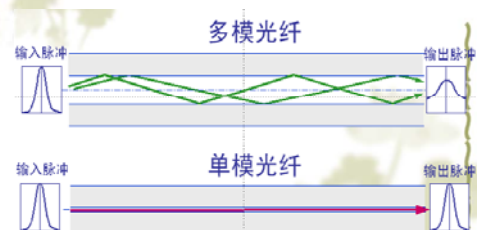
单模光纤

若光纤的直径减小到只有一个光的波长，则光纤像一根波导，使光线一直向前传播，不会多次反射，这种光纤为~。

使用昂贵的半导体激光源，光脉冲的衰耗小，适合长距离传输。

119

多模光纤与单模光纤



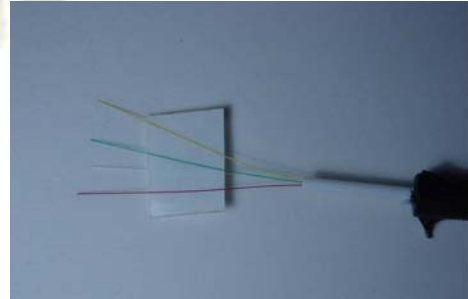
120

光纤传输的特点

- ❖ 光的波长范围（依不同波长光的衰减特性）
 - ❖ 0.85um: 适合多模光纤通信;
 - ❖ 1.30um: 适合多模和单模光纤通信;
 - ❖ 1.55um: 用于单模光纤通信。
- ❖ 光纤传输特点
 - ❖ 通信损耗低、频带宽、数据传输速率高、抗电磁干扰好, 安全性好;
 - ❖ 体积小、重量轻等, 但所需的通信部件（发送器、接收器和连接部件）较昂贵。

121

实际的光纤



122

常用电缆特性比较

电缆类型	费用	安装	能力	距离	抗电磁干扰性
同轴细缆 (Thinnet)	<STP	便宜、容易	典型10Mbps	185米	敏感性<UTP
同轴粗缆 (Thicknet)	>STP <Fiber	容易	典型10Mbps	500米	敏感性<UTP
屏蔽双绞线 (STP)	>UTP <Thicknet	还算简单	典型16Mbps 最大500Mbps	100米	敏感性<UTP
非屏蔽双绞线 (UTP)	最低	便宜、容易	典型10Mbps 最大100Mbps	典型100米	最敏感
光缆 (Fiber)	最高	昂贵、困难	典型100Mbps	几公里	不敏感

123

电磁波频谱



124

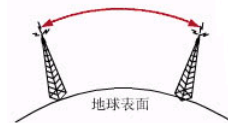
非导向传输媒体

- ❖ 用自由空间作为传输介质来进行数据通信。
- ❖ 特点: 信号具有较强的方向性, 沿直线传播, 不能绕开固体障碍物, 要求发送和接收方之间存在视线通路。
- ❖ 适用: 架设或铺埋电缆或光缆较困难的地方, 广泛应用于电话领域构成的蜂窝式无线电话网。
- ❖ 分类: 地面微波接力通信、卫星通信、红外线与毫米波通信

125

地面微波接力通信

- ❖ 原理: 长距离传输时每隔一段距离就需架中继站, 将前一信号放大向后传。
- ❖ 优点: 频带宽、通信容量大、传输质量高、可靠性较好、投资少、见效快、灵活等。
- ❖ 缺点: 相邻站间必须直视, 不能有障碍物; 受气候干扰较大、保密性差、中继站的使用与维护问题等。



126

卫星通信

- ❖ 原理：用位于36000公里高空的**人造同步卫星**做中继器的一种微波接力通信。



127

红外线与毫米波通信

- ❖ 优点：价格便宜，易制造，有良好的安全性，不易被窃听。
- ❖ 缺点：不能穿透坚硬的物体，对环境气候敏感。
- ❖ 适用：被广泛应用于短距离通信，红外线成为室内无线局域网的主要选择对象，如遥控器，防盗警报等。

128

常用无线传输介质比较

传输媒体	数据传输速率	传输距离	抗干扰性	价格	应用	示例
短波	几十~几百bps	全球	一般，通信质量差	较低	远程低速通信	广播
地面微波接力通信	1~10Mbps	几百公里	很好	低于同容量和长度的电缆	远程通信	电视
卫星通信	1~10Mbps	几万公里	很好	费用与距离无关	远程通信	电视、电话、数据

129

第2章 物理层

- ❖ 2.1 基本通信理论
- ❖ 2.2 传输介质
- ❖ 2.3 同步光纤网和同步数字系列
- ❖ 2.4 物理层协议举例

130

2.3 SONET和SDH

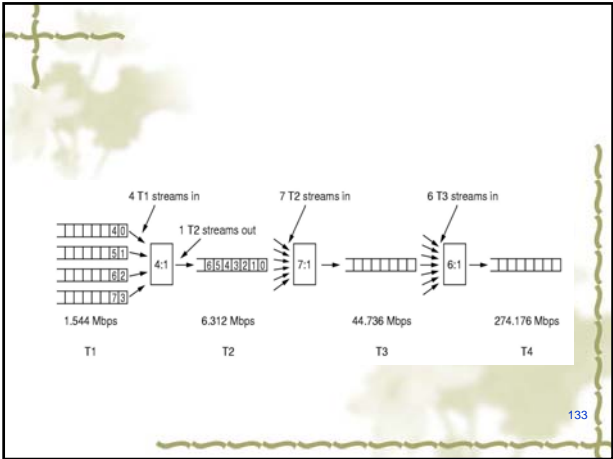
- ❖ 数字传输网上传输的信号一般都是经过TDM以后形成的数字信号的群路信号。旧的数字传输系统存在着许多缺点：
- ❖ **速率标准不统一**
 - 北美和日本的T1及欧洲的E1速率，为了提高速率又搞了高次群。
 - 如果不对高次群的数字传输速率进行标准化，国际范围的高速数据传输就很难实现。
- ❖ **不是同步传输**
 - 同步通信要求接收端时钟频率和发送端时钟频率一致。发送端发送连续的比特流。
 - 异步通信时不要求接收端时钟和发送端时钟同步。发送端发送完一个字节后，可经过任意长时间间隔再发送下一个字节。
 - 在过去相当长的时间，为了节约经费，各国的数字网主要是采用**准同步**方式。

131

多个T1或E1线路的复用

- ❖ 一次群：T1=1.544Mb/s
E1=2.048Mb/s
- ❖ 二次群：T2=T1×4+...=6.312Mb/s
E2=E1×4+...=8.448Mb/s
- ❖ 三次群：T3=T2×7+...=44.736Mb/s
E3=E2×4+...=34.304Mb/s
- ❖ 四次群：T4=T3×6+...=274.176Mb/s
E4=E3×4+...=139.264Mb/s

132



SONET标准

- ❖ 1988年，美国推出同步光纤网数字标准，即SONET（Synchronous Optical Network）标准。
- ⚡ 同步光纤网 SONET中，整个同步网络的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟。
- ⚡ SONET为光纤传输系统定义了同步传输的线路速率等级结构，其传输基本速率为51.84Mb/s。
 - ❖ 对电信号，第1级同步传送信号 STS-1 (Synchronous Transport Signal)的传输速率是 51.84 Mb/s。
 - ❖ 光信号则称为第1级光载波 OC-1，OC 表示Optical Carrier。

134

SONET的速率及复用

- ❖ SONET的基本帧：
 - ⚡ 每秒传送8000帧，即每125 μs内传输810个字节，因此数据速率= 8 bit × 810 Byte × 8000 Hz = 51.84 Mbps，这是SONET最基本的信道，即STS-1
- ❖ 一个STS-n的帧长是STS-1帧长的n倍，其他不变，因此STS-n的数据率是STS-1的数据率的n倍
 - ⚡ 多条STS-1支流的复用可构成其它的SONET干线，如3条STS-1支流被合成为1条3 × 51.84 Mbps = 155.52 Mbps的STS-3流。
- ❖ 对应于STS-n的光纤线路被称作OC-n（Optical Carrier Level），因此OC-1的速率也是51.84Mb/s
 - ⚡ OC-n表示由n条单独的OC-1线路组成

135

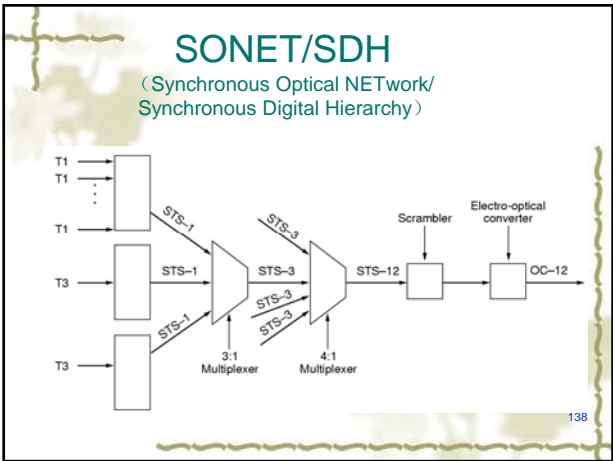
SDH标准

- ❖ ITU-T 以美国标准 SONET 为基础，制订出国际标准同步数字系列 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)。
- ❖ SDH 的基本速率为 155.52 Mb/s，称为第1级同步传递模块 (Synchronous Transfer Module)，即 STM-1，相当于 SONET 体系中的 OC-3 速率。

136

SONET 的 OC 级/STS 级与 SDH 的 STM 级的对应关系			
线路速率 (Mb/s)	SONET 符号	ITU-T 符号	表示线路速率的常用近似值
51.840	OC-1/STS-1	—	
155.520*	OC-3/STS-3	STM-1	155 Mb/s
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080*	OC-12/STS-12	STM-4	622 Mb/s
933.120	OC-18/STS-18	STM-6	
1244.160	OC-24/STS-24	STM-8	
1866.240	OC-36/STS-36	STM-12	
2488.320*	OC-48/STS-48	STM-16	2.5 Gb/s
4876.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gb/s

137



SONET与SDH的关系

- ❖ SDH与SONET之间差别很小。
- ❖ SONET主要用于北美和日本，SDH主要用于欧洲和中国。
- ❖ SONET的基本速率为51.84Mb/s，而SDH的基本速率为155.52Mb/s。
- ❖ SONET/SDH，采用TDM技术，是同步系统，由主时钟控制，时钟精度 10^{-9} 。
 - ⚡ SONET和PCM的采样速率一样，为每秒8000帧；
 - ⚡ 对于SONET的第1级同步传送信号STS-1每帧的长度为810字节，共 $810 \times 8\text{bit}$ 。
 - ⚡ 一个STS- n 帧的长度是STS-1帧长的 n 倍。

139

SONET与SDH标准的意义

- ❖ SDH/SONET标准的制定，使北美、日本和欧洲等不同的数字传输体制在STM-1等级上获得了统一。并将此基础上的更高的数字传输速率作为国际标准。
- ❖ SDH/SONET是第一次真正实现数字传输体制上的国际标准。

140

第2章 物理层

- ❖ 2.1 基本通信理论
- ❖ 2.2 传输介质
- ❖ 2.3 同步光纤网和同步数字系列
- ❖ 2.4 物理层协议举例

141

物理层特性

- ❖ 物理层的主要任务描述为确定与传输媒体的接口的一些特性，即：
 - ⚡ **机械特性**：指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等等。
 - ⚡ **电气特性**：指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
 - ⚡ **功能特性**：指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。
 - ⚡ **规程特性**：指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

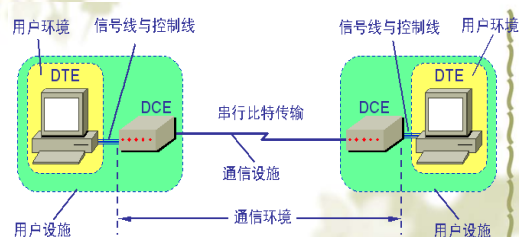
142

物理层标准举例 EIA-232-E接口标准

- ❖ EIA-232-E是美国电子工业协会EIA制定的，在1991年修改发布的著名物理层异步通信接口标准。它是DTE和DCE间的接口标准。
- ❖ DTE (Data Terminal Equipment) 是**数据终端设备**，是具有一定的数据处理能力和发送、接收数据能力的设备。
 - ⚡ DTE可以是计算机、终端或是一个I/O设备。
- ❖ DCE (Data Circuit-terminating Equipment) 是**数据电路端接设备**，它在DTE和传输线路之间提供信号变换和编码的功能，并且负责建立、保持和释放数据链路的连接。
 - ⚡ 典型的DCE是一个MODEM。

143

DTE通过DCE 与通信传输线路相连



144

EIA-232-E接口标准

- ❖ 机械特性
 - 使用25芯标准连接器。插头用于DTE，插座用于DCE侧；
- ❖ 电气特性
 - 采用-15V~+15V电压，逻辑电平“0”；
 - 接口传输速率：110, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200bps；传输距离不超过15m；
- ❖ 功能特性
 - 定义25芯信号线，其中14根为数据线、控制线、信号线、控制线；
 - 最常用的信号线为：TXD, RXD, GND, CTS, DSR, DTR, RTS, DCD。



145

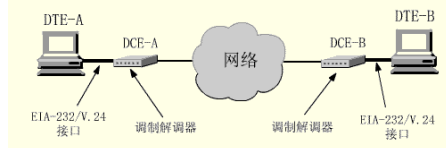
EIA-232/V.24 的信号定义



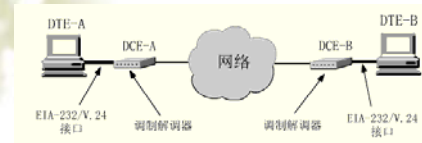
146

EIA-232

- ❖ 规程特性
 - EIA232规定了DTE和DCE之间的信号时序的应答关系和操作过程。
 - DTE通过EIA-232的进行通信的过程

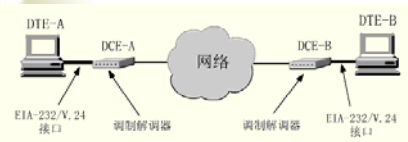


147



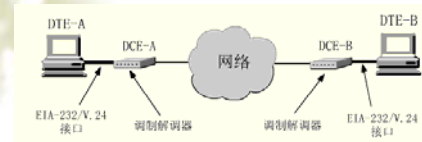
- ① DTE-A将引脚20“DTE就绪”置为ON，同时通过引脚2“发送数据”向DCE-A传送电话号码信号。
- ② DTE-B将引脚22“振铃指示”置为ON，通知DTE-B有入呼叫信号到达（在振铃的间隙以及其他时间，振铃指示均为OFF状态）。DTE-B将其引脚20“DTE就绪”置为ON。DCE-B接着产生载波信号，并将引脚6“DCE就绪”置为ON，表示已准备好接收数据。

148



- ③ 当DCE-A检测到载波信号时，将引脚8“载波检测”和引脚6“DCE就绪”都置为ON，以便使DTE-A知道通信电路已经建立。DCE-A还可通过引脚3“接收数据”向DTE-A发送在其屏幕上显示的信息。
- ④ DCE-A接着向DCE-B发送其载波信号，DTE-B将其引脚8“载波检测”置为ON。

149



- ⑤ 当DTE-A要发送数据时，将其引脚4“请求发送”置为ON。DCE-A作为响应将引脚5“允许发送”置为ON。然后，DTE-A通过引脚2“发送数据”发送其数据。DCE-A将数字信号转换为模拟信号向DCE-B发送过去。
- ⑥ DCE-B将收到的模拟信号转换为数字信号经过引脚3“接收数据”向DTE-B发送。

150

RS-449接口标准

- ❖ EIA-232接口标准有两个主要的缺点：
 - ⚡ 数据传输速率的上限为20kb/s;
 - ⚡ 连接电缆的最大长度不超过15m;
- ❖ EIA制定了新的RS-449标准，它由 3 个标准组成。即：
 - ⚡ RS-449：规定机械、功能和规程特性，为37根引脚。
 - ⚡ RS-423-A：规定非平衡传输时的电气特性。
 - ⚡ RS-422-A：规定平衡传输时的电气特性。
- ❖ 典型的RS-449的传输速率可达到48~168kb/s.

151

小结

- ❖ 本章要求
 - ⚡ 了解物理层的基本功能、传输介质，掌握数据通信理论中的一些基本概念（调制/解调、编码/解码、复用/解复用等）
 - ⚡ 重点掌握网络性能指标（数据速率、带宽、时延等）、FDM/TDM、PCM等
- ❖ 习题
- ❖ 作业

152