

现代计算机网络

1.2 Direct Link Networks的基本理论与技术

2

直连网络-最简单的网络

1.2.1 Hardware Building Blocks

- Nodes
- Links

1.2.2 编码技术

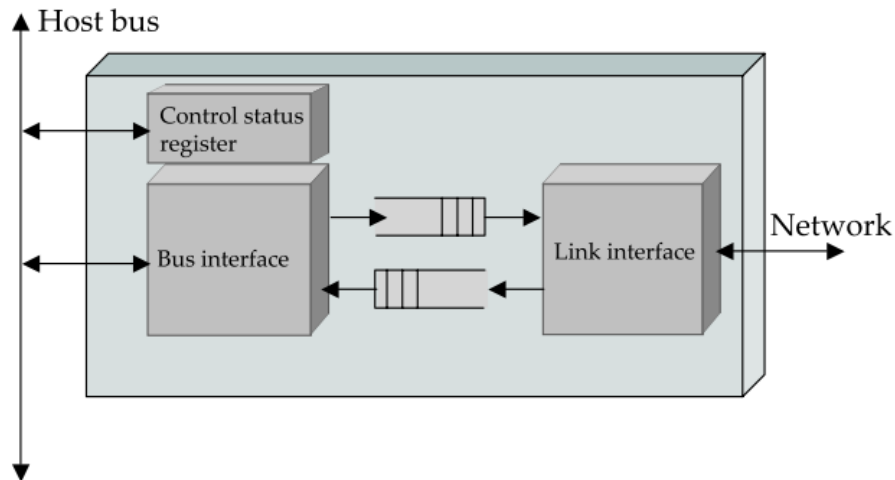
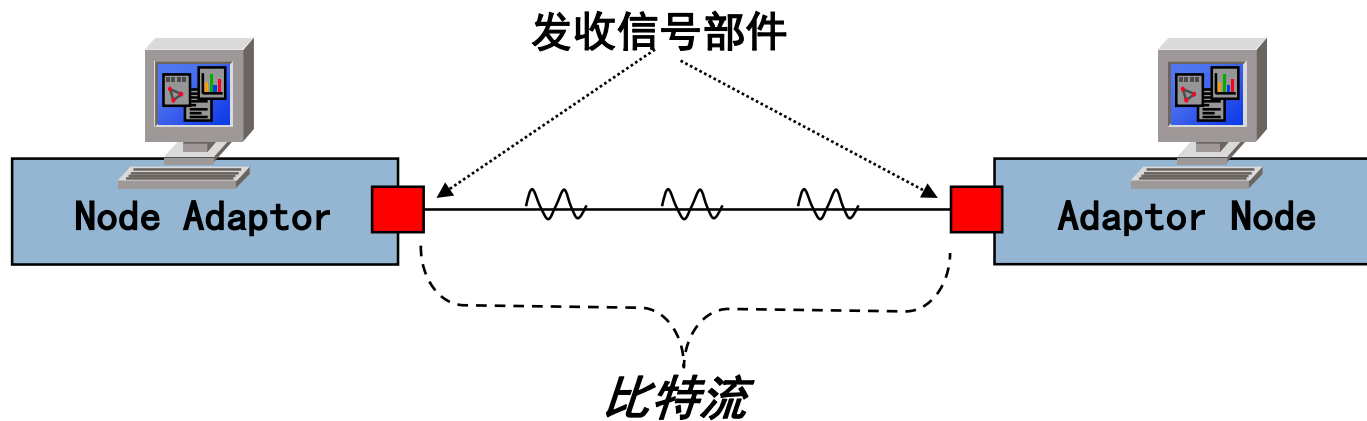
1.2.3 成帧技术

1.2.4 信道共享

1.2.5 差错控制

1.2.1 直连网络-Nodes

3



1.2.1 直连网络-Links

香农定理决定了一个链路传输能力上限

- 这个传输能力C用bps为单位，跟链路上信号的信噪比相关 (S/N, decibels or dB)
- $C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$
 - ▣ Where $B = 3300 - 300 = 3000\text{Hz}$, S is the signal power, N the average noise.
 - ▣ The signal to noise ratio (S/N) is measured in decibels is related to $\text{dB} = 10 \times \log_{10}(S/N)$. If there is 30dB of noise then $S/N = 1000$.
 - ▣ Now $C = 3000 \times \log_2(1001) = 30\text{kbps}$.
 - ▣ How can we get 56kbps?

1.2.1 直连网络-Links

5



Coaxial



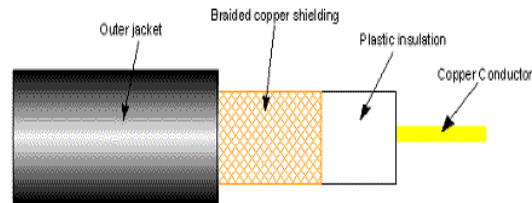
Fiber-optic

Unshielded Twisted Pair

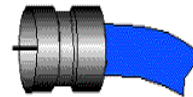


Various types of network media.

Coaxial Cable

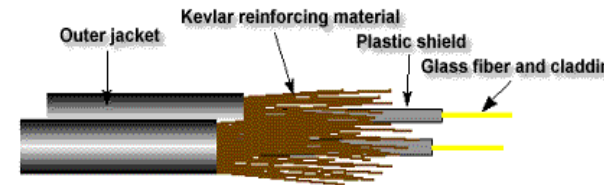


BNC connector

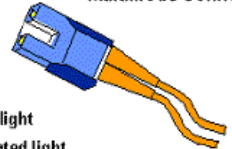


Speed and throughput: 10 - 100Mbps
 Average \$ per node: Inexpensive
 Media and connector size: Medium
 Maximum cable length: 500 m (medium)

Fiber Optic Cable



Multimode Connector



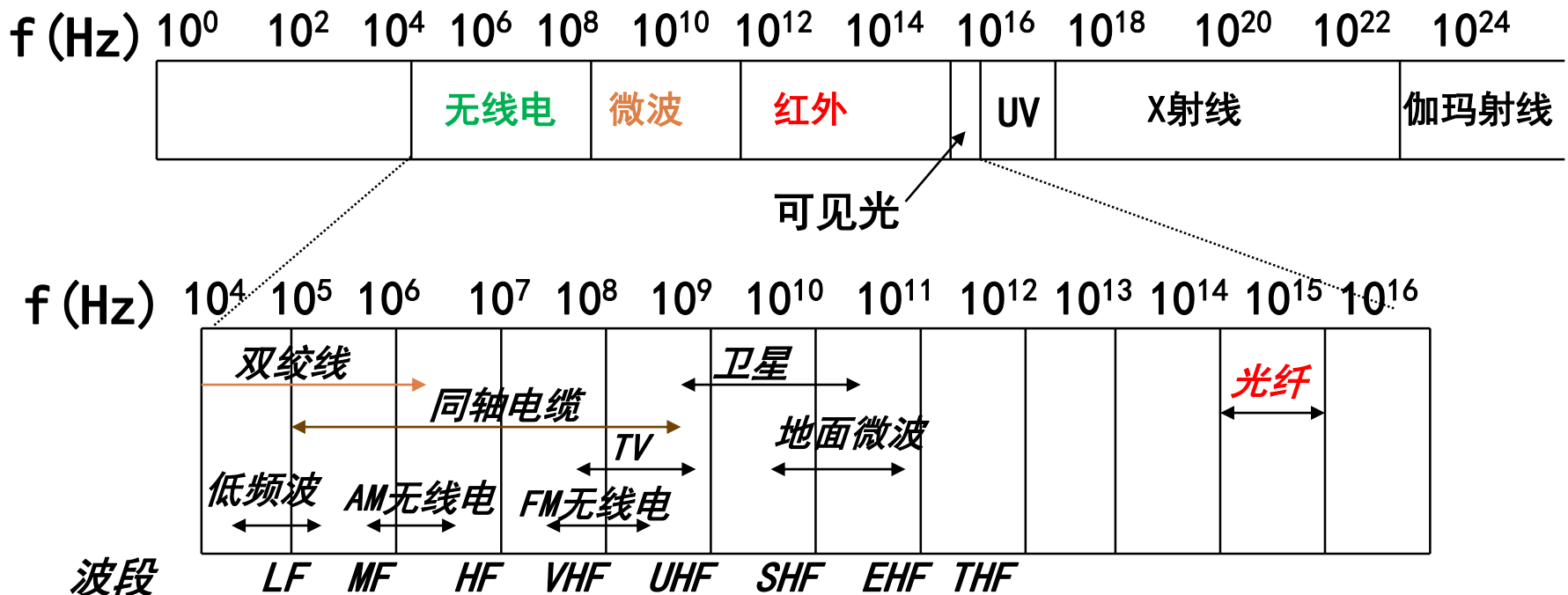
Speed and throughput: 100+ Mbps
 Average \$ per node: Most Expensive
 Media and connector size: Small
 Maximum cable length: up to 2 Km
 Single mode: One stream of laser-generated light
 Multimode: Multiple streams of LED-generated light

电磁波谱与媒介

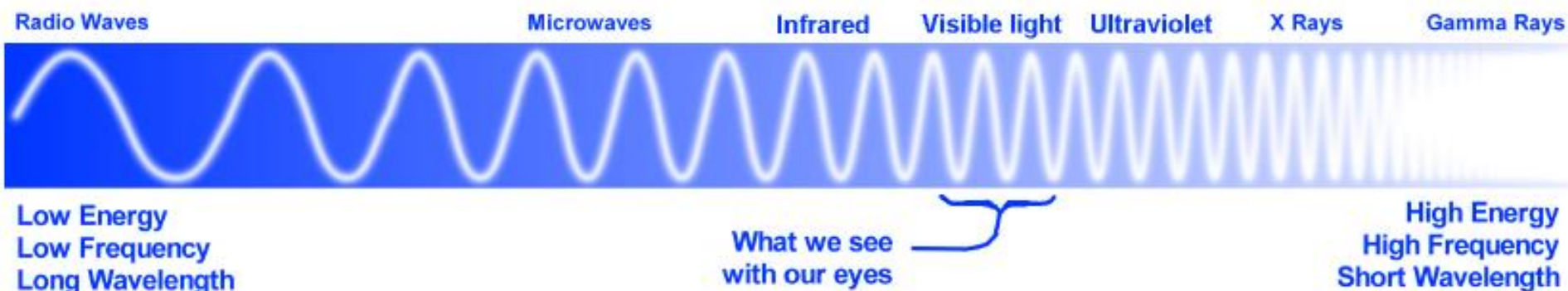
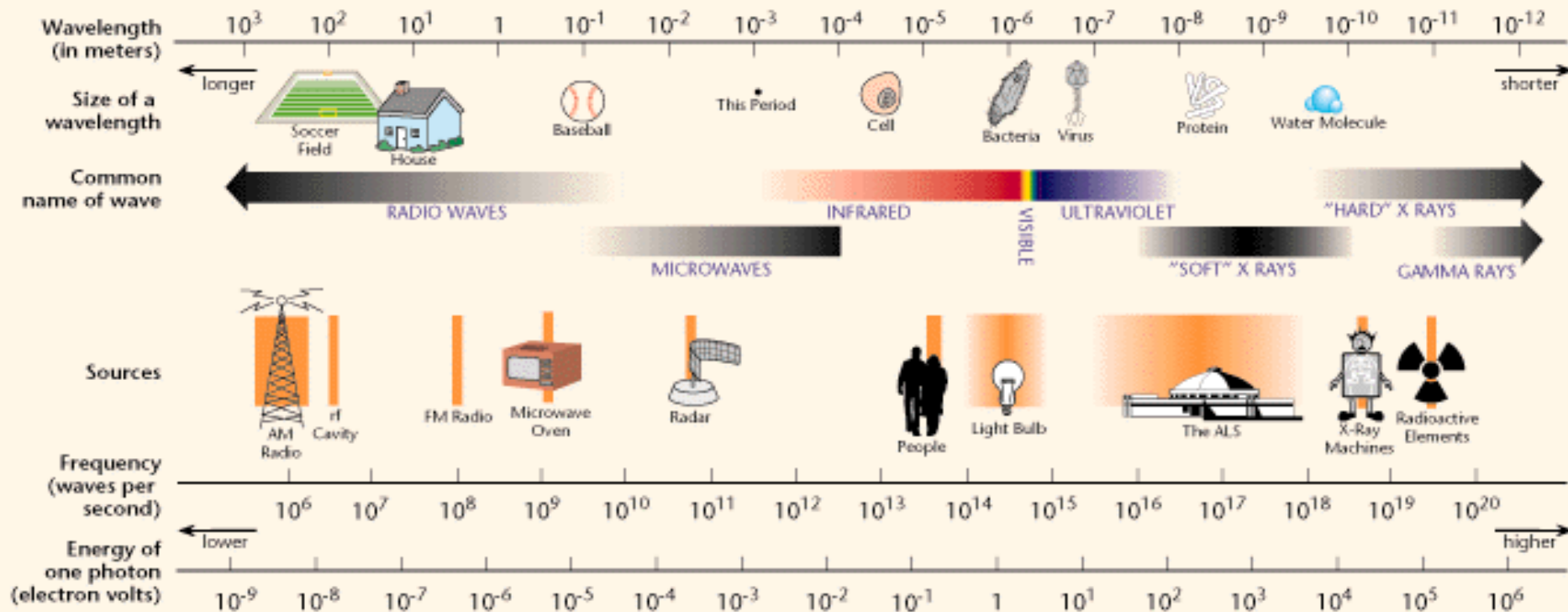
6

□ 传输媒介：

- 导向媒介：电磁波被固体媒体导向传播（金属线或光纤）
- 非导向媒体：自由空间球面传播，常称为无线传输



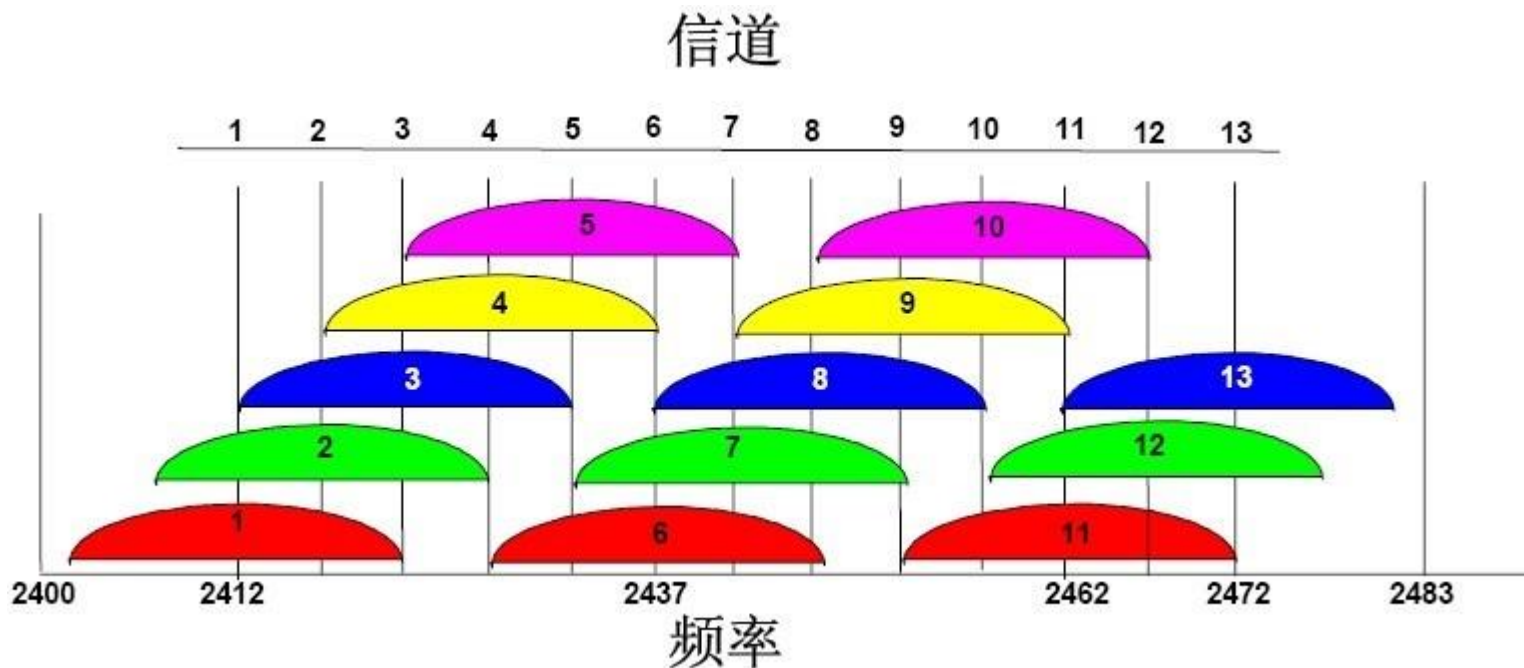
THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



WiFi频率

8

- Wi-Fi 技术被 IEEE 802.11b/g/n 定义被操作在2.4 GHz 的频率中，在其中这个 2.4 GHz 频谱被划分为14个交叠的、错列的20 MHz 无线载波信道，它们的中心频率分别为5 MHz。802.11a/n 被操作在有更多信道的 5.0GHz 频谱中。
- 一些微波炉也同在2.4G频段内，其功率有在千瓦以上，这已经是Wi-Fi的万倍数量级了



WiFi频率

- 太阳光功率密度约是1.3千瓦/平方米，GSM手机，最大发射功率为2瓦，而平均发射功率仅为125毫瓦。当周围信号较好时，手机能够比较轻易的获得信号，所以发射功率就会减小，此时辐射也比较小。当周围信号不好时，手机就会加强辐射强度，以便接受更多的信号，辐射强度也就随之增强。
- WiFi等效全向辐射功率（EIRP）在欧盟被限制为100mW

主干线路带宽

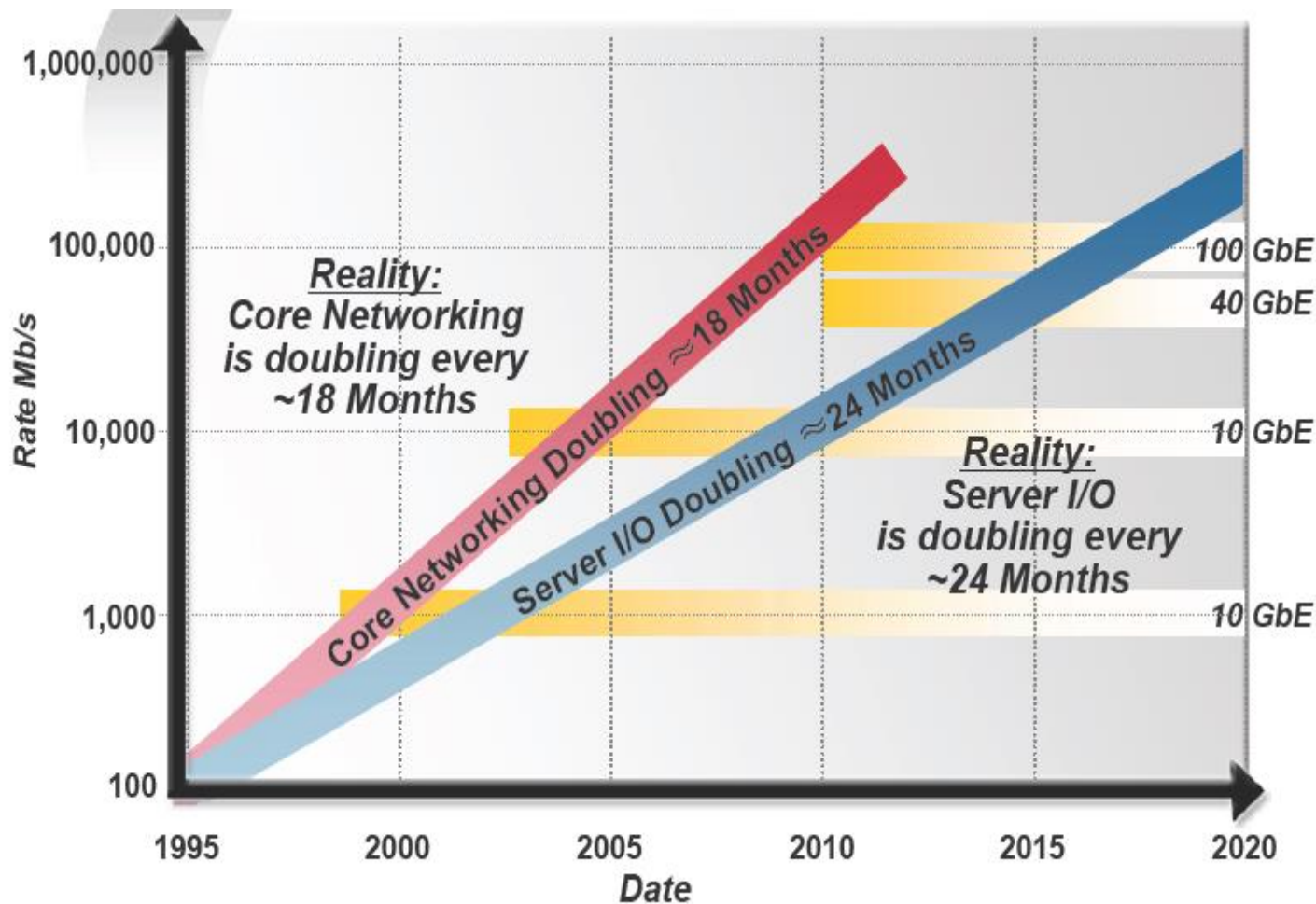
10

线路速率 Mbps	SONET 符号	ITU-T SDH 符号	速率 近似值
51.840	OC-1/STS-1	STM-0	
155.520	OC-3/STS-3	STM-1	155Mbps
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080	OC-12/STS-12	STM-4	622Mbps
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	2.5Gbps
4876.460	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10Gbps
	DWDM		40 Gbps
	DWDM		100 Gbps

- **OC: Optical Carrier**
Synchronous Optical Networking (SONET) 的传输单位
- **STS: Synchronous Transport Signal**
SONET的帧，决定了传输速率
- **SDH: Synchronous Digital Hierarchy**
同步光纤网通过分时来加快传输速度，到达10G的瓶颈后引入了分频的光波复用技术

主干线路带宽

11



1.2.2 编码技术

信号：表示信息的物理量

- ▣ 模拟信号：一组特别的数据点之间及所有可能点之间都是连续的信号
- ▣ 数字信号：离散点构成的信号

信号调制：修改信号的幅度、频率和相位及其组合形式来标示和携带数据信息的过程

调制的一个原因：

- ▣ 我们知道链路上信噪比的重要性，影响信号的噪声在不同频率上的强度并非完全一样。
- ▣ 如果能把原始信号移动到噪声频率谱上噪声强度最低的频率上去，就可以避开本底噪声很高的区域，和其他没有被彻底屏蔽掉的干扰信号。
- ▣ 信号调制时，需要选择一个「载波」——这个载波就可以选择系统噪声强度最低区域的频率。

1.2.2 编码技术

13

◆ 信号的物理层处理

- 模拟→模拟；（调制）
- 模拟→数字；（编码）
- 数字→数字；（编码）
- 数字→模拟。（调制）

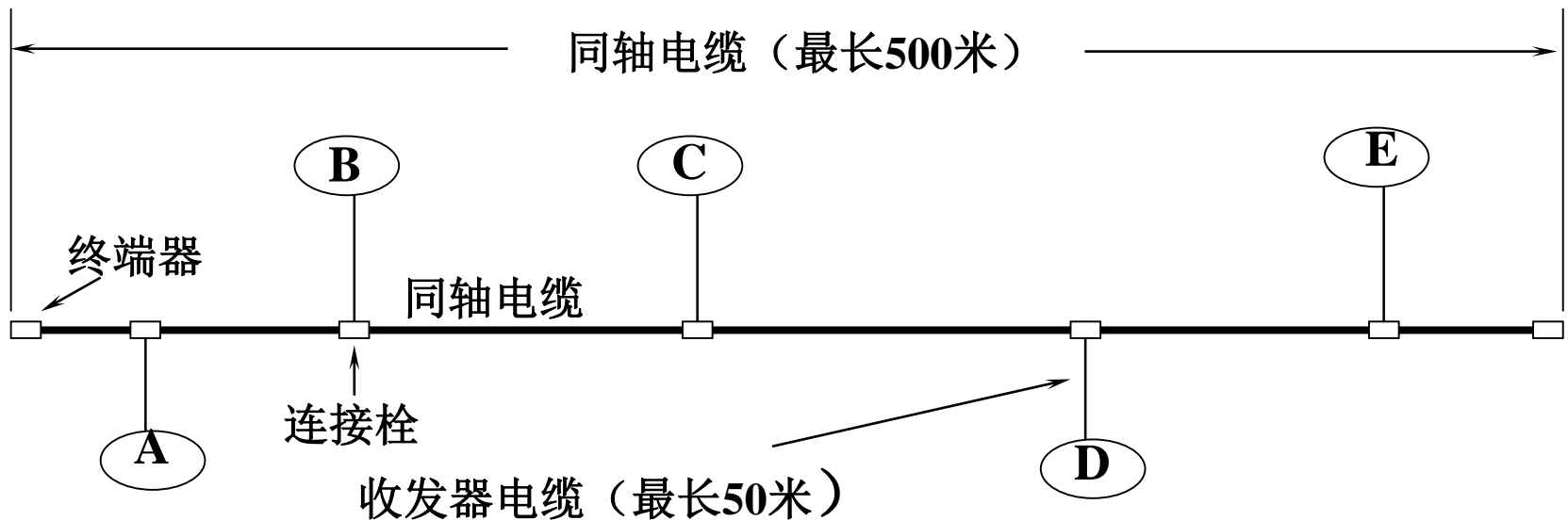
◆ 比特的逻辑层编码

- 4B/5B
- 8B/10B
- 64B/66B

基带传输信号

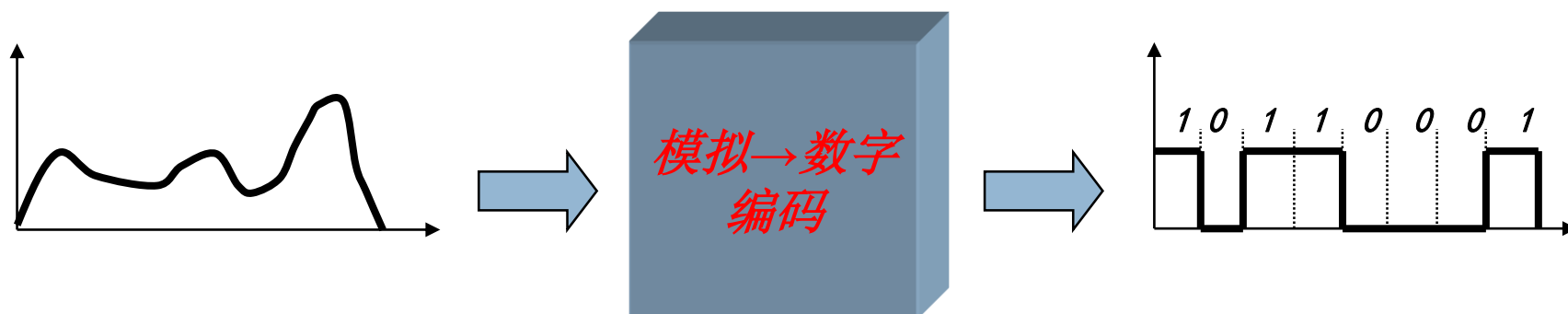
14

- 未经调制的电脉冲信号呈方波形式，所占频宽从直流和低频开始。
- 近距离内，基带的功率衰减不大
- RS-232/Ethernet/Token Ring



模拟→数字编码

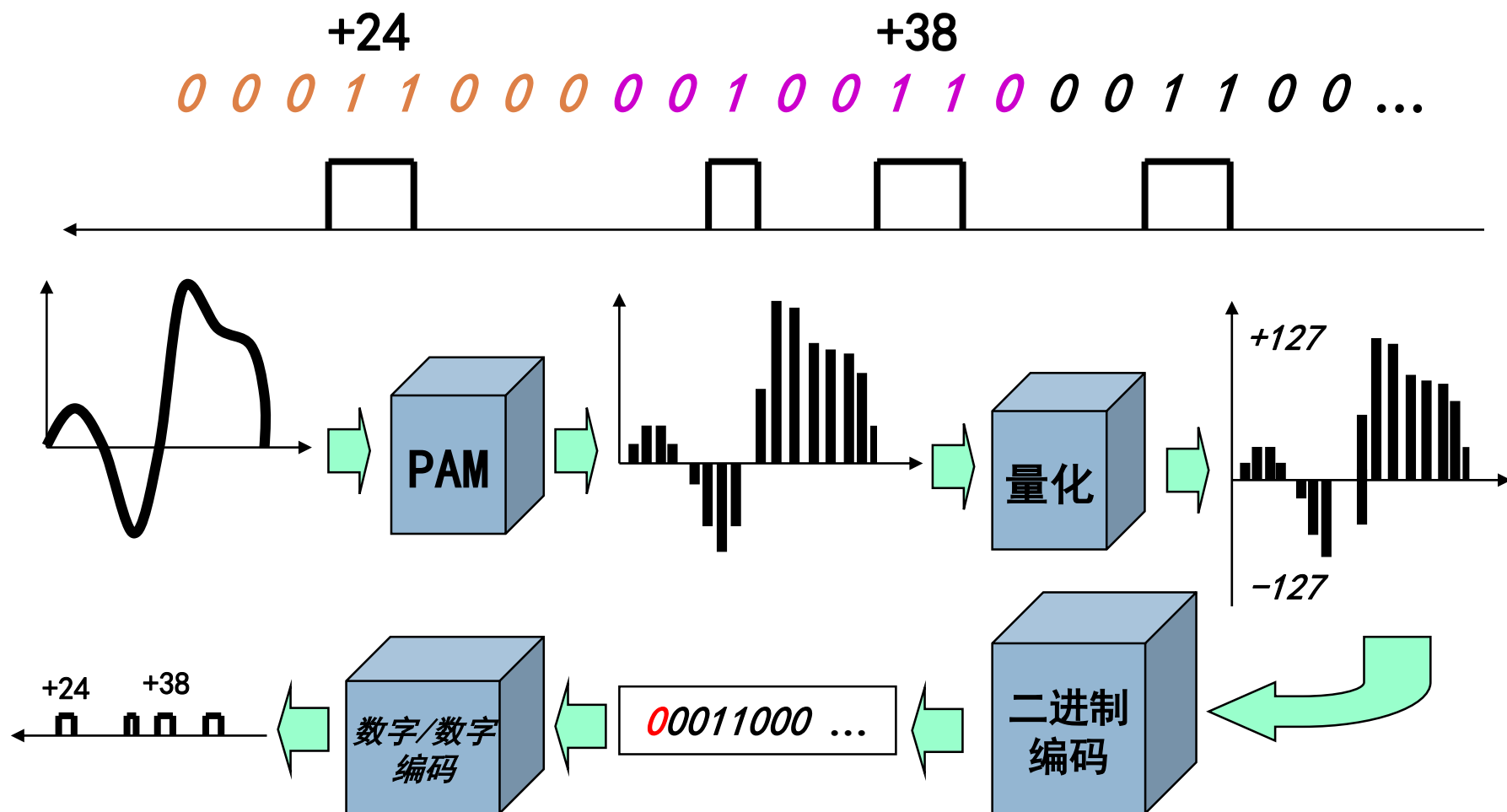
15



- PAM: Pulse Amplitude Modulation (脉冲幅度调制)
- PCM: Pulse Code Modulation (脉冲码调制) 也是一个重要的模拟到数字的转换方法

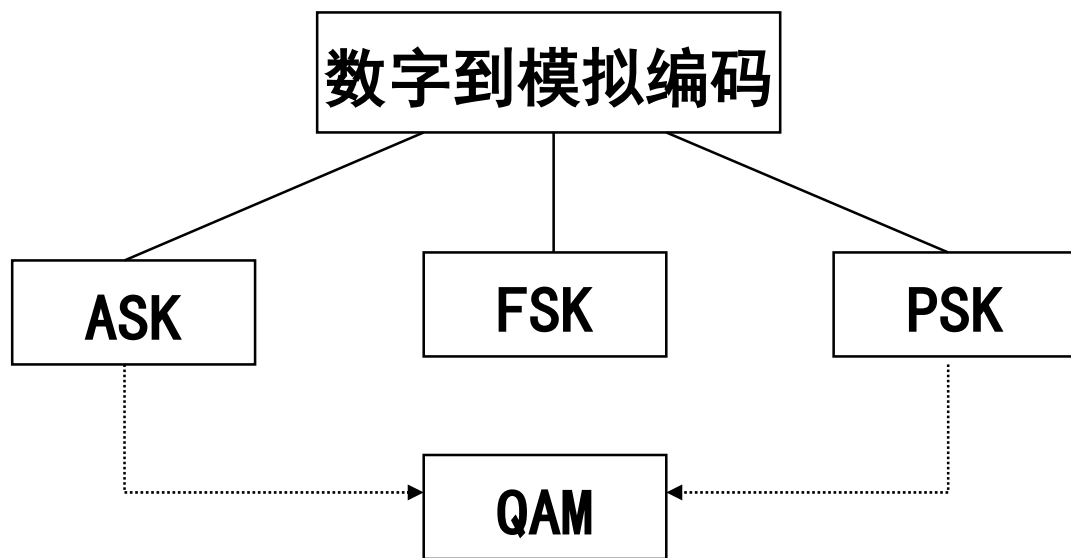
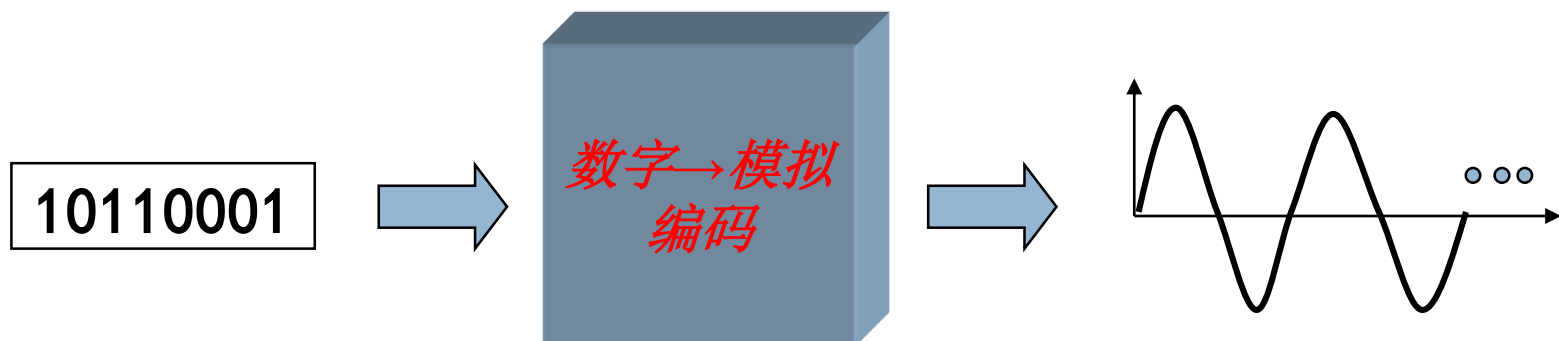
从模拟到数字(PCM)

16



数字→模拟编码

17



ASK: Amplitude Shift Keying
幅移键控

FSK: Frequency Shift Keying
频移键控

PSK: Phase Shift Keying
相移键控

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

正交幅度编码（有线电视）

比特率与波德率

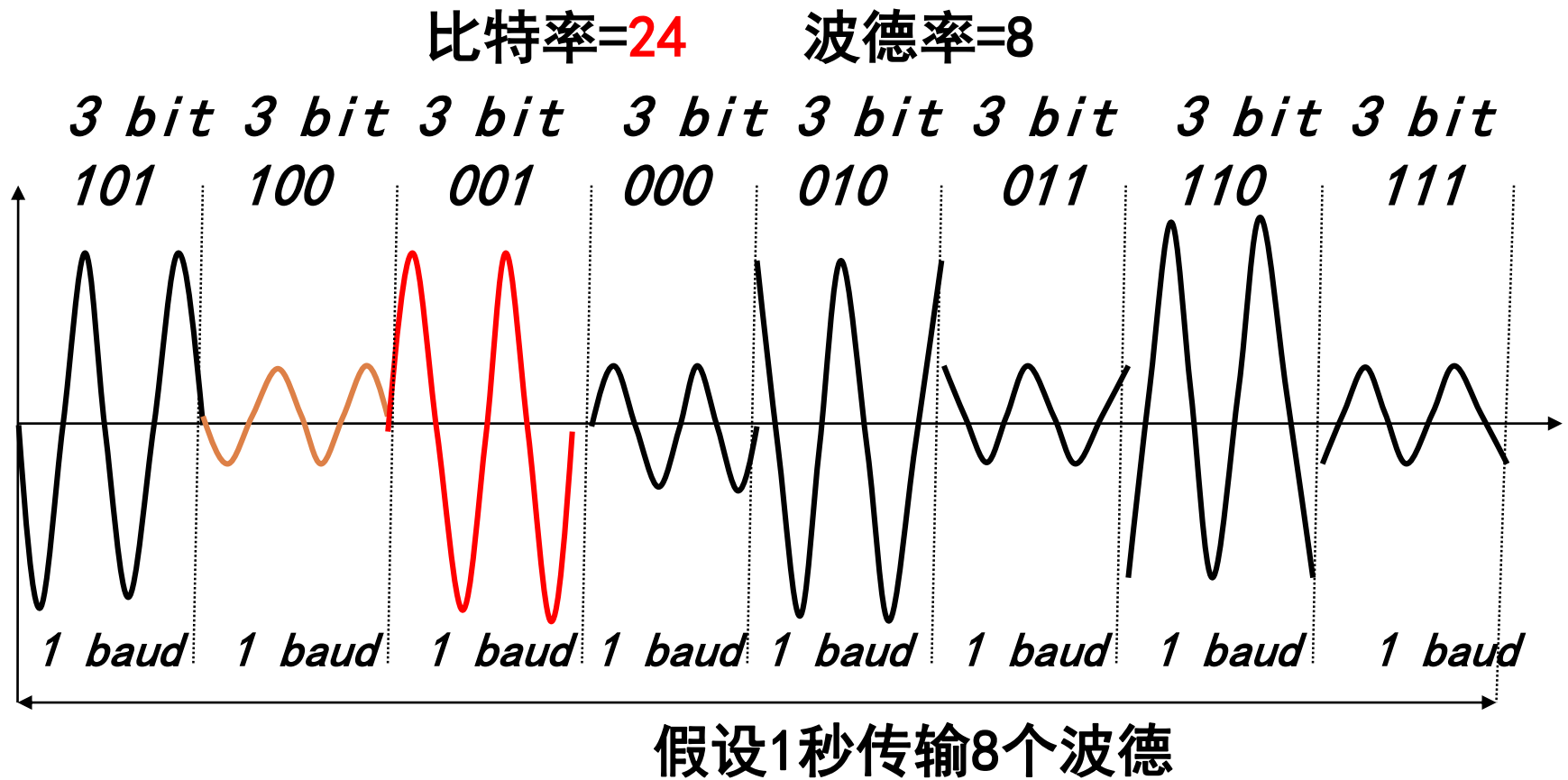
18

- 比特率Bit Rate: bps = bit/s
 - ▣ 每秒内传输的比特数。
- 波德率Baud Rate:Buad
 - ▣ 每秒内为表示某些比特而需要的信号单元数（或码元数）
- 当仅当一个信号单元表示一比特时，比特率才等于波德率。
- $\text{Bit Rate} = \log_2(\text{Bit Units}) \times \text{Baud Rate}$

编码	单位	比特/波德	波德率	比特率
<i>ASK,FSK,2-PSK</i>	<i>Bit</i>	<i>1</i>	<i>N</i>	<i>N</i>
<i>4-PSK,4-QAM</i>	<i>DiBit</i>	<i>2</i>	<i>N</i>	<i>2N</i>
<i>8-PSK,8-QAM</i>	<i>TriBit</i>	<i>3</i>	<i>N</i>	<i>3N</i>
<i>16-QAM</i>	<i>QuadBit</i>	<i>4</i>	<i>N</i>	<i>4N</i>
<i>32-QAM</i>	<i>PentBit</i>	<i>5</i>	<i>N</i>	<i>5N</i>
<i>64-QAM</i>	<i>HexBit</i>	<i>6</i>	<i>N</i>	<i>6N</i>
<i>128-QAM</i>	<i>SepBit</i>	<i>7</i>	<i>N</i>	<i>7N</i>
<i>256-QAM</i>	<i>OctBit</i>	<i>8</i>	<i>N</i>	<i>8N</i>

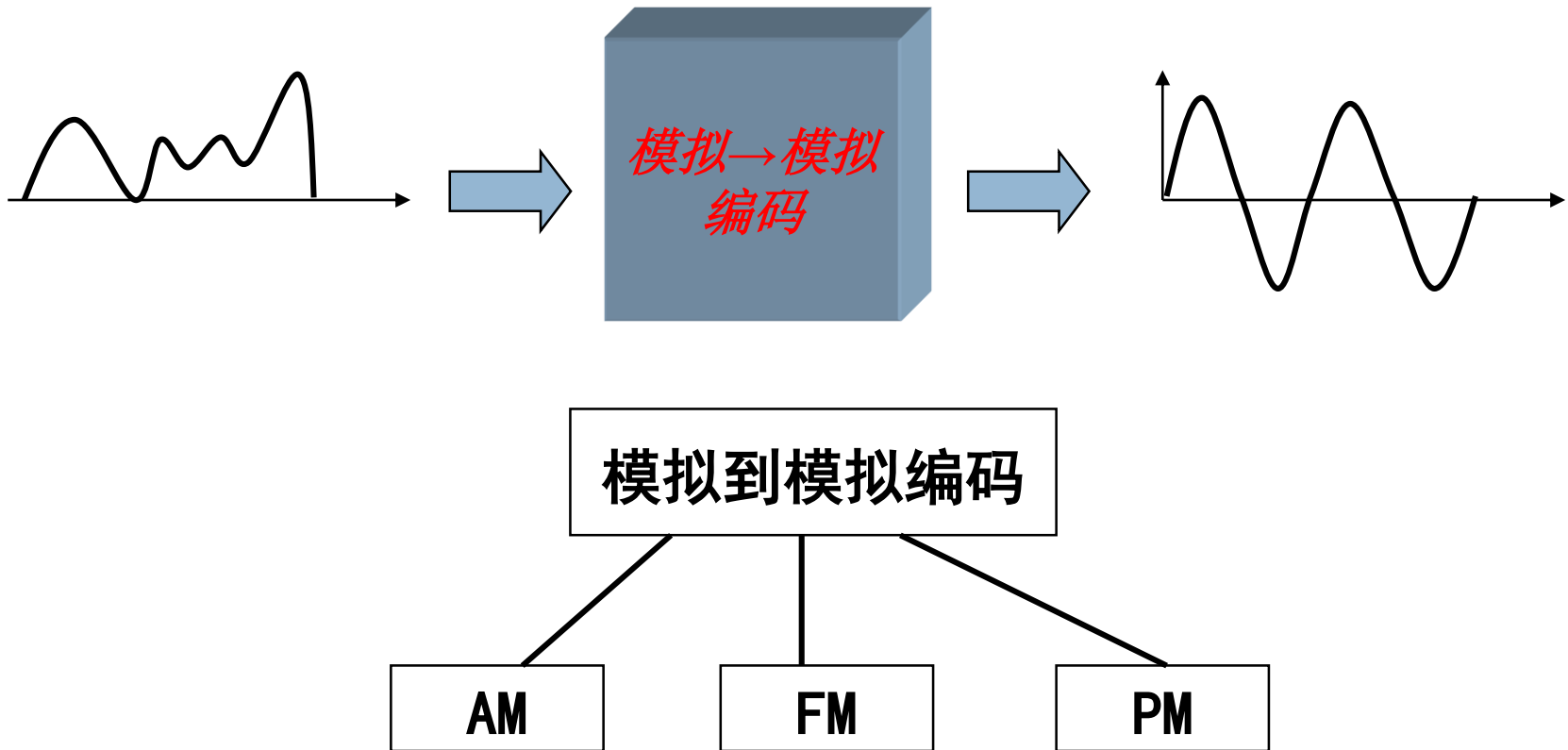
$8(2^3) = (2^2 \text{ 相位} * 2^1 \text{ 幅度})$ —QAM

19



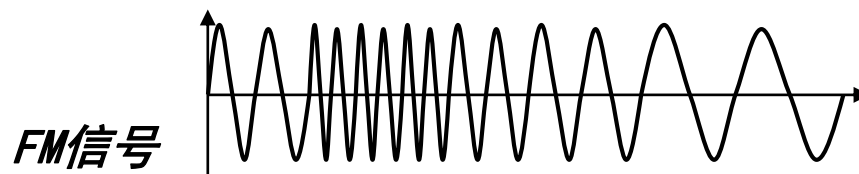
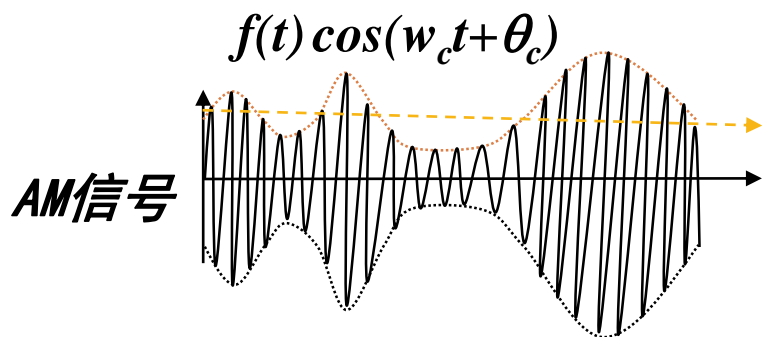
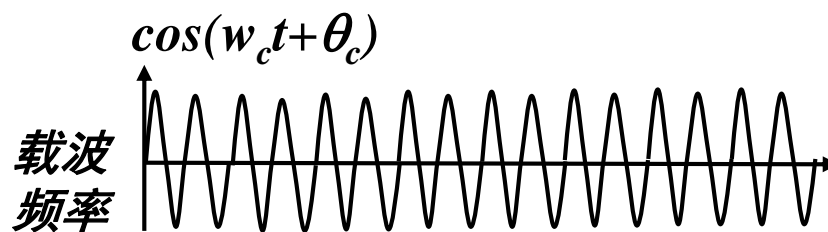
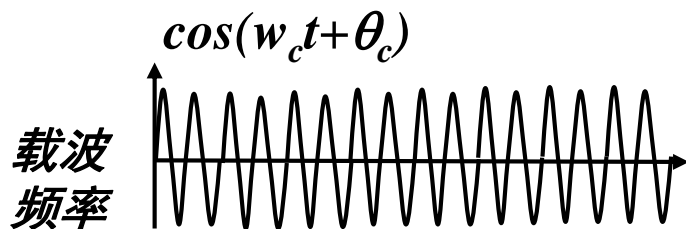
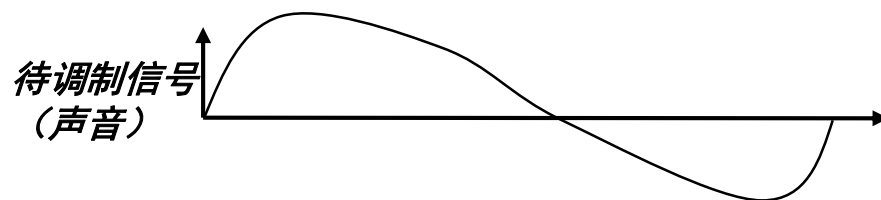
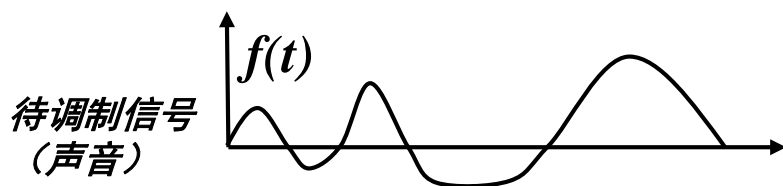
模拟→模拟调制

20



模拟→模拟调制

21



幅度调制AM-载波的F&P不变

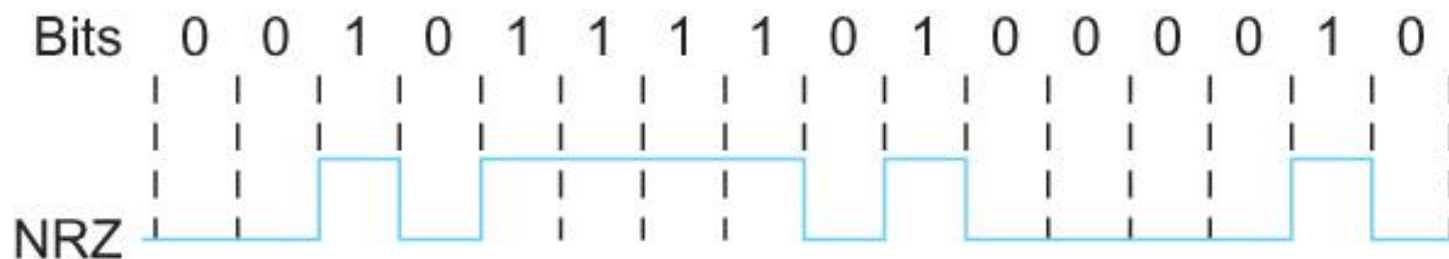
频率调制FM-载波的A&P不变

逻辑层编码

问题：逻辑层编码显然是数字到数字的编码，为什么要做逻辑层编码呢？

信号中可能有连续0和连续1，造成两个不好的影响：

- 信号平均值的漂移 (Baseline Wander)
- 信号时钟的不同步 (Clock Recovery Error)



最基本的NRZ encoding

逻辑层编码

□ Problem with NRZ (1)

▣ Baseline wander

- The receiver keeps an average of the signals it has seen so far
- Uses the average to distinguish between low and high signal
- When a signal is significantly low than the average, it is 0, else it is 1
- Too many consecutive 0's and 1's cause this average to change, making it difficult to detect

逻辑层编码

□ Problem with NRZ (2)

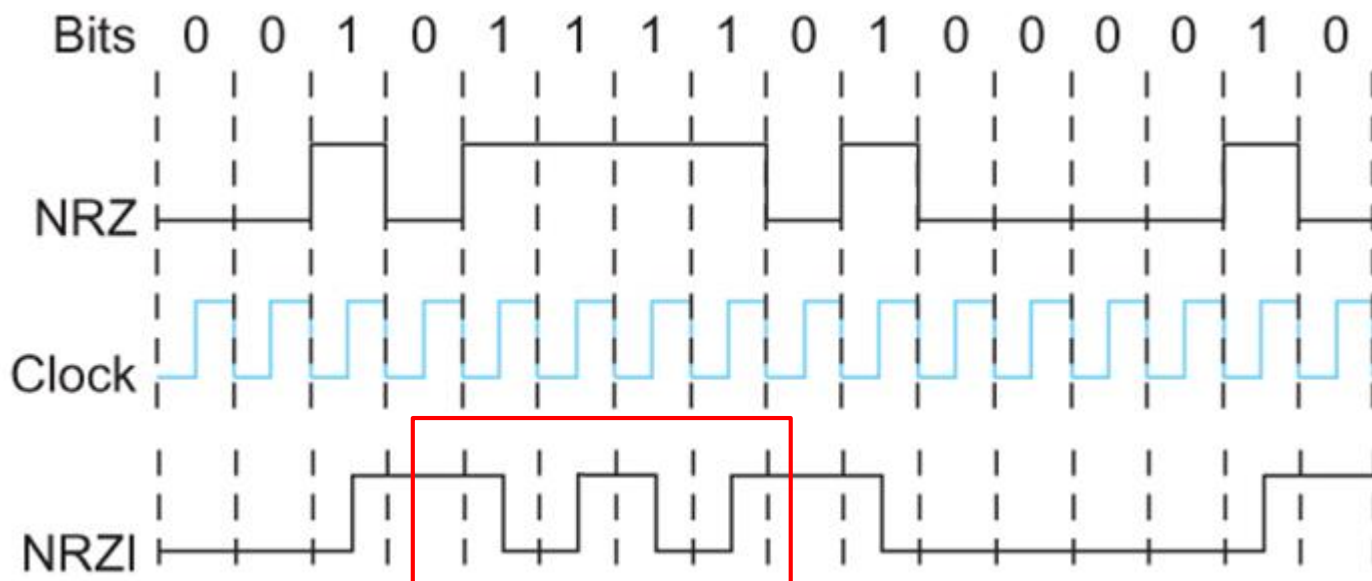
▣ Clock recovery

- Frequent transition from high to low or vice versa are necessary to enable clock recovery
- Both the sending and decoding process is driven by a clock
- Every clock cycle, the sender transmits a bit and the receiver recovers a bit
- The sender and receiver have to be precisely synchronized

逻辑层编码

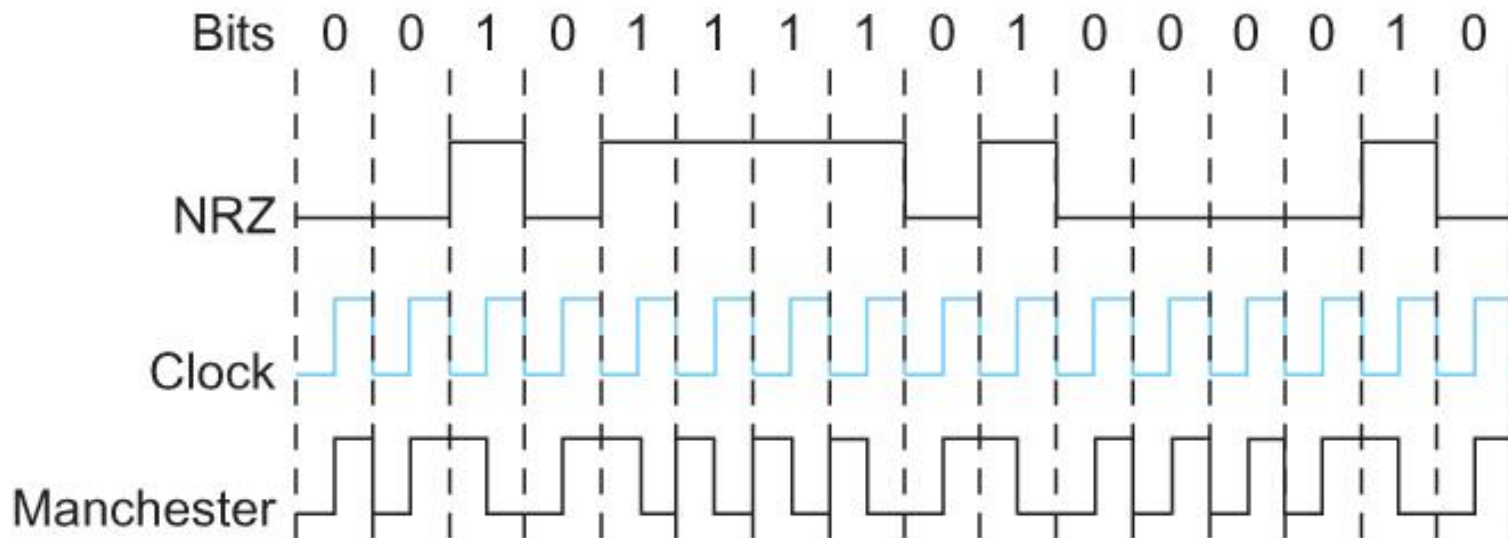
改进的NRZI编码方案

- Non Return to Zero Inverted (RZ, NRZ, NRZI)
- Sender makes a transition from the current signal to encode 1 and stay at the current signal to encode 0
- Solves for consecutive 1's



逻辑层编码

- Manchester encoding
 - ▣ Clock is an internal signal that alternates from low to high, a low/high pair is considered as one clock cycle
 - ▣ In Manchester encoding
 - 0: low → high transition
 - 1: high → low transition



逻辑层编码

- Problem with Manchester encoding
 - ▣ Doubles the rate at which the signal transitions are made on the link
 - Which means the receiver has half of the time to detect each pulse of the signal
 - ▣ In Manchester the bit rate is half the baud rate

逻辑层编码

□ 如何解决NRZ和Manchester两种编码的矛盾呢？

4B/5B encoding

- ▣ Insert extra bits into bit stream so as to break up the long sequence of 0' s and 1' s
- ▣ Every 4-bits of actual data are encoded in a 5-bit code that is transmitted to the receiver
- ▣ 5-bit codes are selected in such a way that each one has no more than one leading 0(zero) and no more than two trailing 0' s.
- ▣ No pair of 5-bit codes results in more than three consecutive 0' s
- ▣ The resulting 5-bit codes are then transmitted using the NRZI encoding

逻辑层编码

4B/5B encoding (书上有完整对照表)

0000	→	11110
0001	→	01001
0010	→	10100
..		
..		
1111	→	11101

then, 16 number left

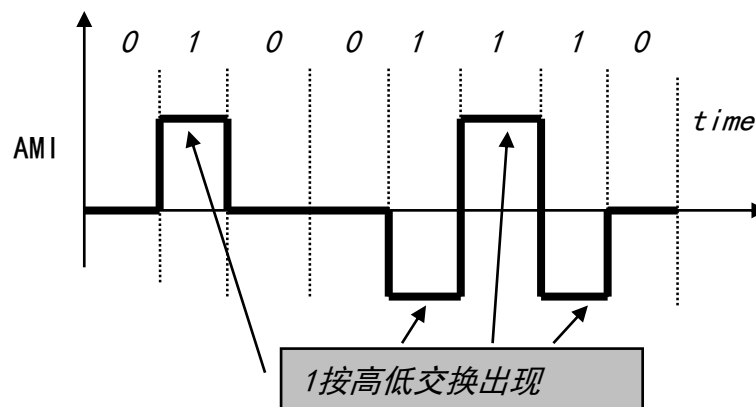
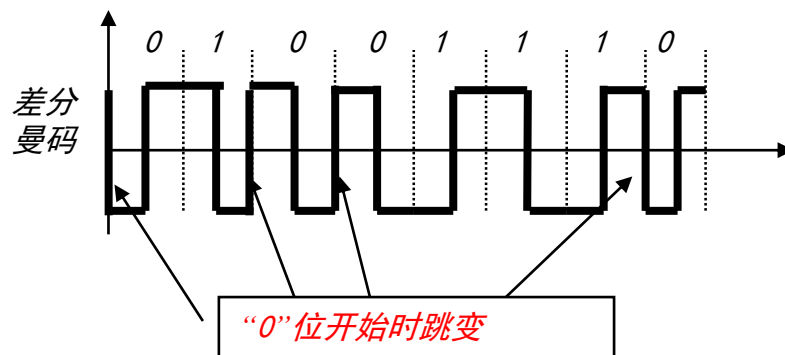
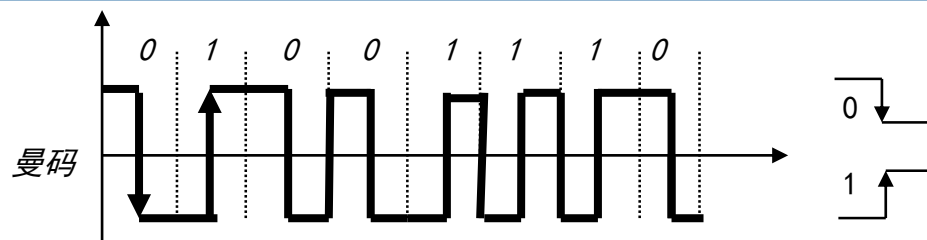
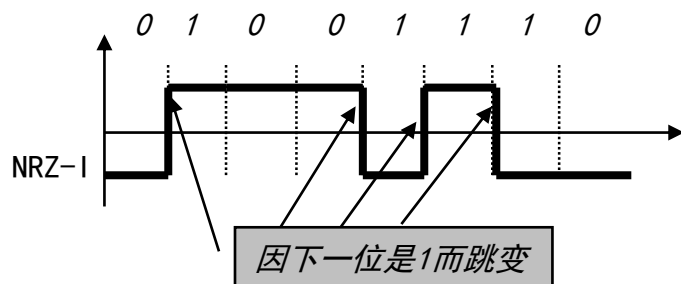
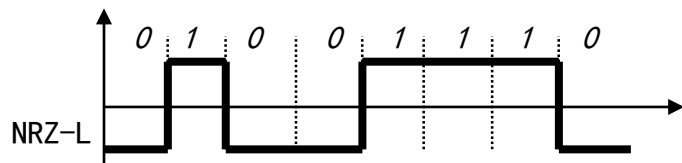
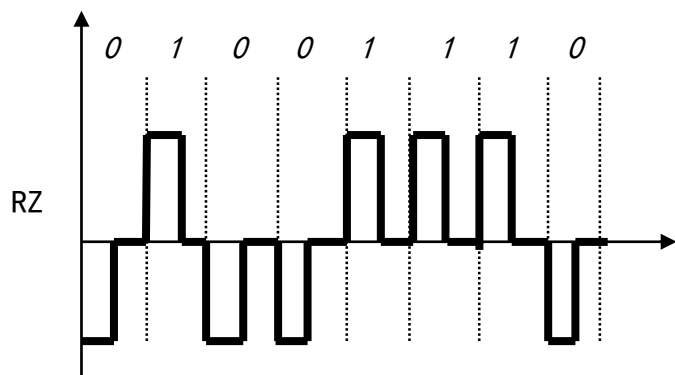
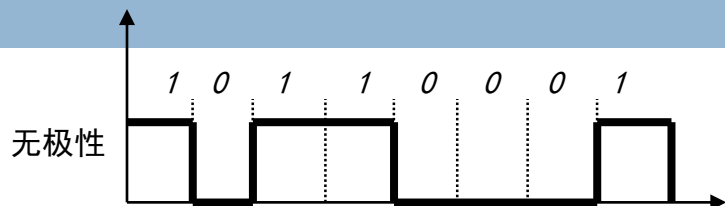
11111 – when the line is idle

00000 – when the line is dead

00100 – to mean halt

then, 13 left : 7 invalid, 6 for various
control signals

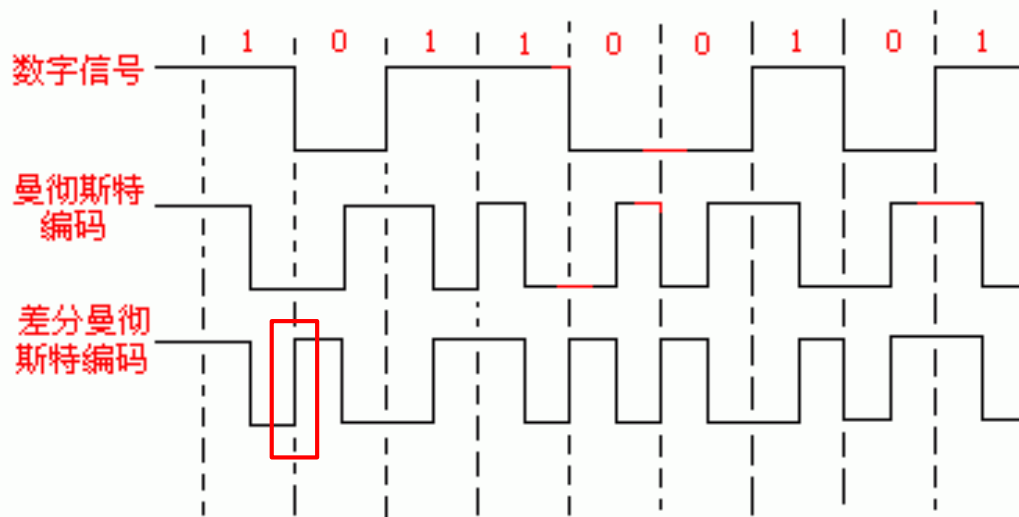
Uses 16 number



逻辑层编码

31

- 以太网使用的曼彻斯特编码（高速以太网不是）
- 差分曼彻斯特编码比曼彻斯特编码规则更加简单、更容易检测，只需要检测信号在数据信号开始是否跳变（可以少检测一次），因此更适合与传输高速的信息，被更广泛使用。然而，由于每个时钟位都必须有一次变化，所以这两种编码的效率仅可达到50%左右



逻辑层编码

32

- 计算4B/5B编码方案效率：
 - ▣ 先4位变成5位编码/再NRZ-I编码
 - ▣ 数据率100Mbps-->125Mbps
 - ▣ 若用曼码则100Mbps-->200Mbps
 - ▣ 所以4B/5B+NRZ-I解决了连续0和连续1的问题，相比曼码效率更高

逻辑层编码

33

- 8Bit/10Bit: 1G光传输
- 64Bit/66Bit: 10G光传输, 最长传输距离40公里。
- 标准:10GBASE—X/R/W三种类型
 - 10GBASE—X (WDM LAN), **8B/10B**编码, 特紧凑包装, 4个接收器和4个在1300nm波长附近以大约25nm为间隔工作的激光器, 每一对发送器/接收器在3.125Gbps速度 (数据流速度为2.5Gbps) 下工作。每端口应是 $3.125/2.5G=1/0.8$, 即80%效率
 - 10GBASE—R (SONET LAN) **64B/66B**编码, 数据流为10Gbps, 时钟速率为10.3Gbps。
 - 10GBASE—W是广域网接口, 与SONET OC-192兼容, 其时钟为9.953Gbps,数据流为9.585Gbps。

1.2.3 成帧技术 (Framing)

34

- 点到点链路间的一块有界数据（有界是为了同步和共享）
- 共享带来的问题：帧的编址



什么是帧 (Frame)?

35

- Frame是一个在具体网络（与类型和厂家有关）第二层上实现的、与硬件有关的特殊分组。是网上传输的最小数据单元。
- Frame = 数据部分 + 发送和接收站点的物理地址 + 处理控制部分。



面向字节的协议

36

编帧最老的方法是面向字符终端协议

- ❑ **BISYNC**: Binary Synchronous Communication Message Protocol, 面向字节的协议由IBM开发, 以字节 (8bit) 为单位, 开始是SYN, SOH (Start Of Header)
- ❑ **DDCMP**: Digital Data Communication Message Protocol, 用于DECNET 都支持ASCII
- ❑ **PPP/SLIP**



Figure 2.12 BISYNC frame format.

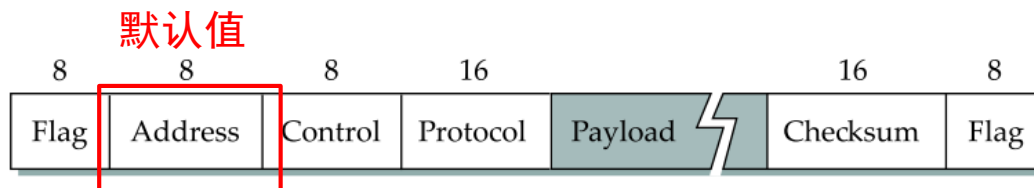


Figure 2.13 PPP frame format.

面向比特协议

37

- 不关心字节的边界
- 把帧看做比特的集合
 - ▣ 可能是ASCII码、图像的像素值、指令、操作数或IP电话的声音值
- SDLC: Synchronous Data Link Control Protocol
 - ▣ Developed By IBM ,was later Standardized by OSI as **HDLC**

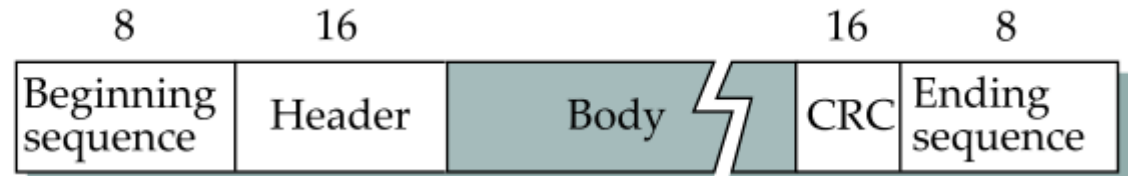


Figure 2.15 HDLC frame format.

观察面向Byte和面向Bit的协议，会发现有些特殊字符或者Bit序列作为帧开始、结束、控制标志，那么如果Body/Payload中有这些标志怎么办？

□ **Character stuffing:**

- ▣ 在特殊字符前加上data-link-escape (DLE)
- ▣ Body中有DLE，那么变成两个DLE

□ **Bit stuffing**

- ▣ 头尾标志是01111110
- ▣ 零比特插入技术，5个连续 ‘1’插 ‘0’
 - 发送时插入 $01111111 = 011111011$
 - 接收时删除 $011111011 = 01111111$

基于时钟的帧 (SONET)

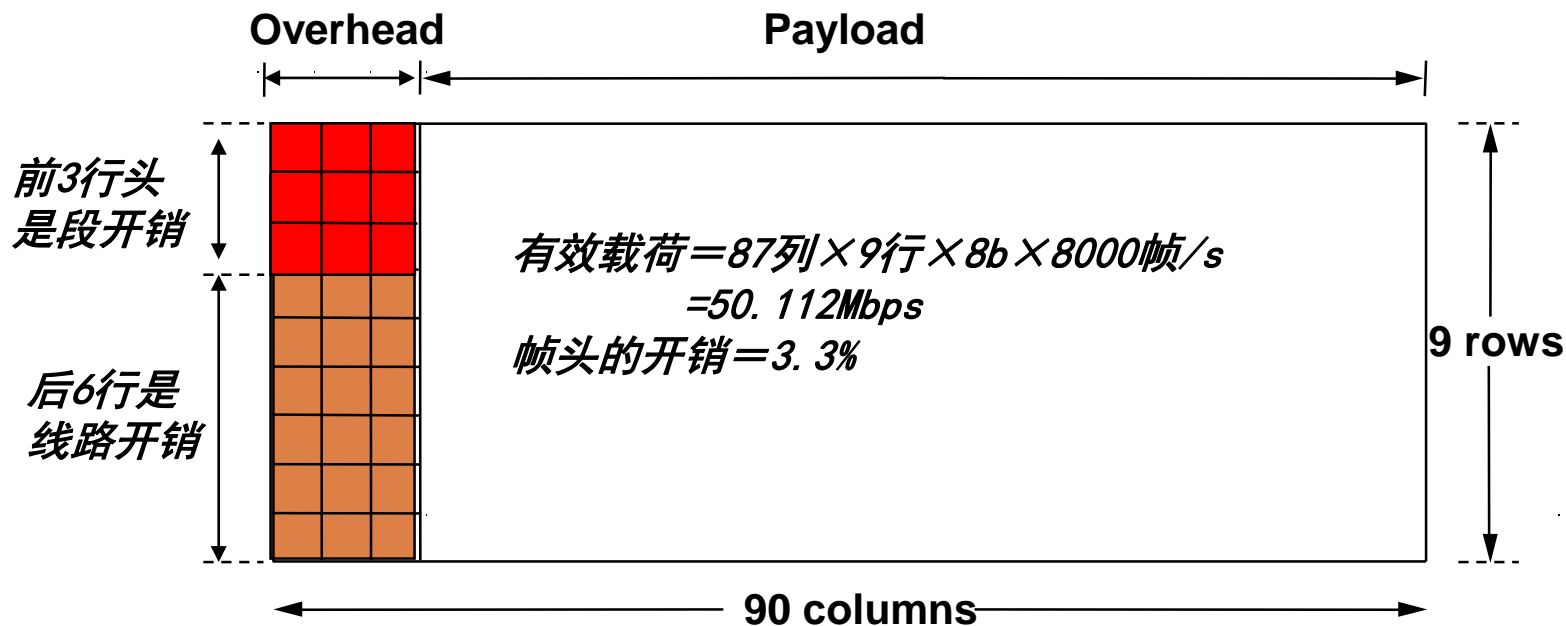
39

- Synchronous Optic Network 标准
 - ▣ 1984年前各公司有自己专用光纤的TDM系统
 - ▣ 1984年后AT&T分解，本地公司须与多个不同标准的长途公司连接
 - ▣ 1995 Proposed, Bell Communications Research开始标准化，
 - ▣ Developed by ANSI for digital trans. Fiber, Adapted & standardized by ITU-T, Clock-based framing
 - ▣ 1989产生SONET和平行的CCITT的SDH，二者只有细微差别
 - ▣ **SDH**: Synchronous Digital Hierarchy in China and Europe for SONET
- SONET所有级别都使用**字节交叉**的多路复用，线路速率都是STS-1=51.84Mbps的整数倍，帧头开销3.3%

SONET STS-1帧同步

40

- 基本SONET帧每125us产生810字节，有无数据都同步发送，故每秒8000帧
- $9 \times 90 = 810 \text{ Bytes/s} \times 8000 = 51.84 \text{ Mbps}$, 构成基本SONET信道
- 每帧前3列留作系统管理信息
- 当段开销的头两个字节A1, A2出现时，接收方就认为这是同步状态，并能正确解释帧



基于时钟的帧 (SONET)

41

- SONET的段开销的头两个字节A1, A2会出现在Payload中吗? 会, 但是不需要Character Stuffing, 因为SONET是固定长度Frame
- SONET为什么存在线路开销呢? 因为线路开销有各种复用的功能, 例如其中保存了一个64K的Voice Channel
- STS-3帧就是时钟频率提高三倍, 第一个字节来自第一个STS-1帧, 第二个字节来自第二个STS-1帧.....原因是让接收器仍然是每秒接收8000帧, 只不过用三个复用的接收器。
- 所以STS-192时候, 速率到达10Gbps, 就无法提高了。

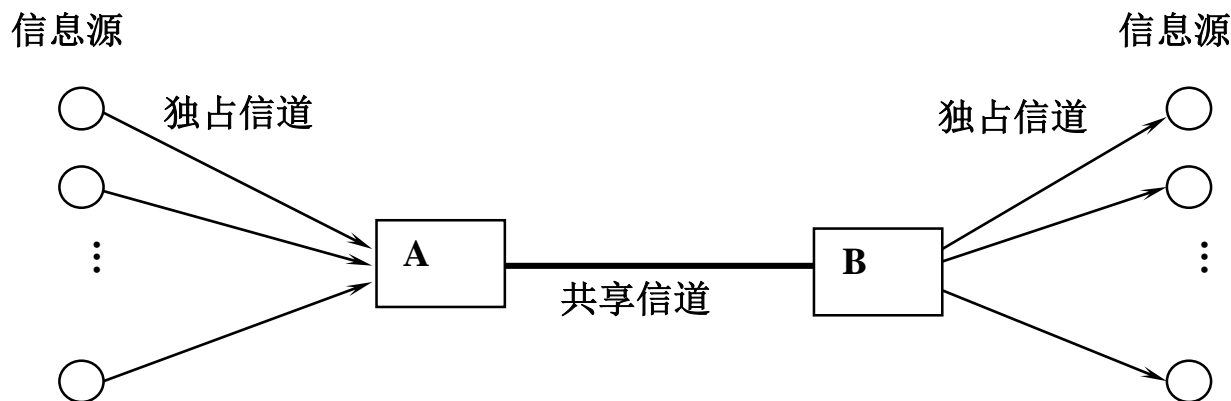
1.2.4 信道共享技术

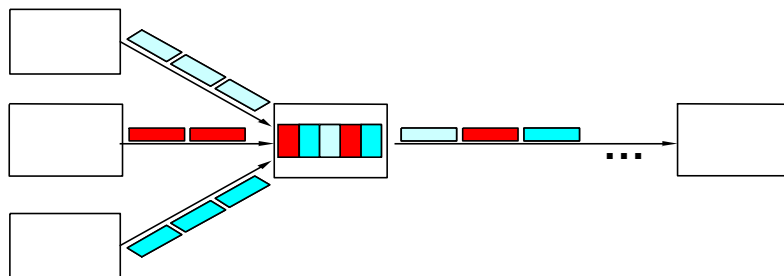
42

- 信道：Channel是通信中传递信息的通道，它由发送与接收信息的设备及传输介质组成。信道有独占或共享两种使用方式
- 资源共享的基本原理
 - ▣ **大数定理**：用户数n越大，其平均值就越趋近期望值。单用户需求分别突发随机产生，整体用户的资源要求变得相当平滑、较稳定和可预测。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\left|\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k - \mu\right| < \varepsilon\right\} = 1$$

- ▣ **规模经济原理**：一定产量范围内，当产量或用户增加时，平均成本不断降低的事实。因为新增产品就可分担更多固定成本，故总成本下降。





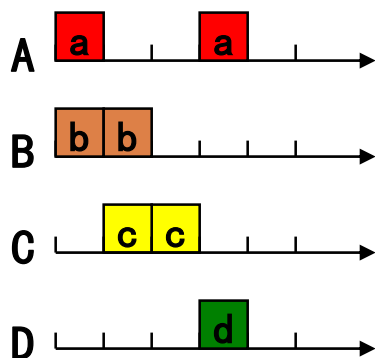
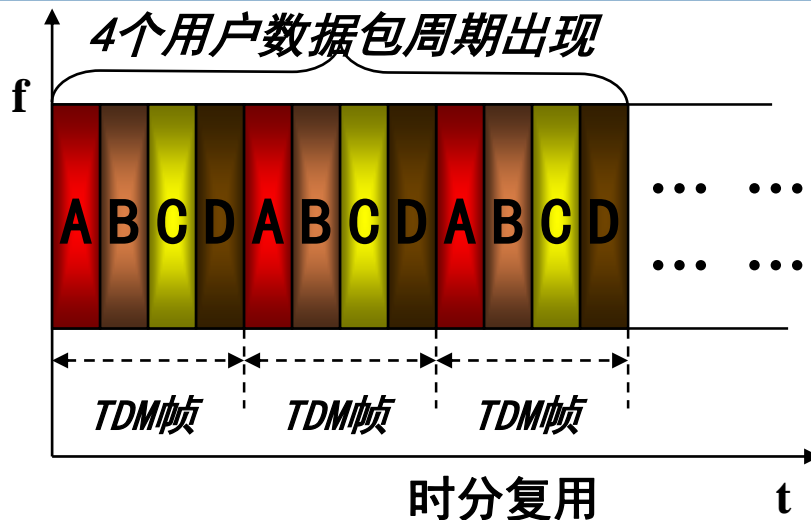
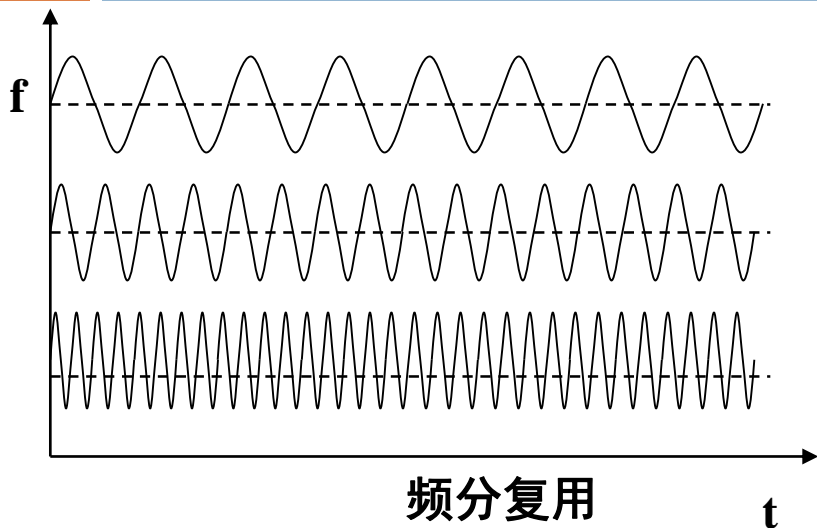
■复用：把共享信道划分成多个子信道，每个子信道传输一路数据

■复用方法

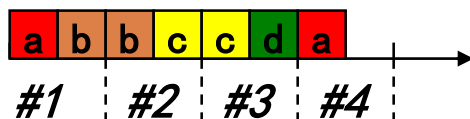
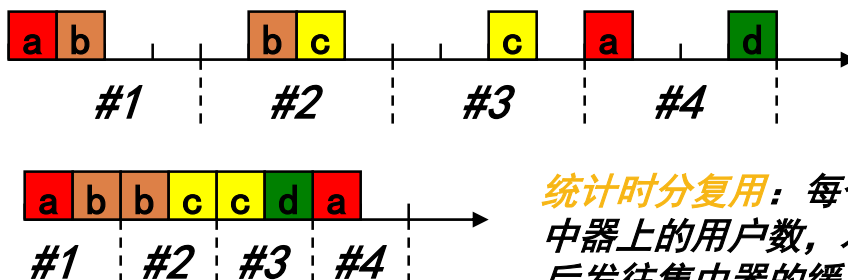
- 时分复用TDM (Time Division Multiplexing) -统计时分复用**STDM**
 - 按时间划分不同的信道，目前应用最广泛
- 频分复用FDM (Frequency Division Multiplexing)
 - 按频率划分不同的信道，如CATV系统
- 波分复用WDM (Wave Division Multiplexing: DWDM/CWDM)
 - 按波长划分不同的信道，用于光纤传输
- 码分复用CDM (Code Division Multiplexing)
 - 按地址码划分不同的信道，如手机

FDM/TDM/STDM的比较

44



时分复用: 复用器按ABCD顺序依次扫描, 然后构成一个时分复用帧, 每个帧有4个时隙, 可见当某用户暂无数据时, 会有空时隙

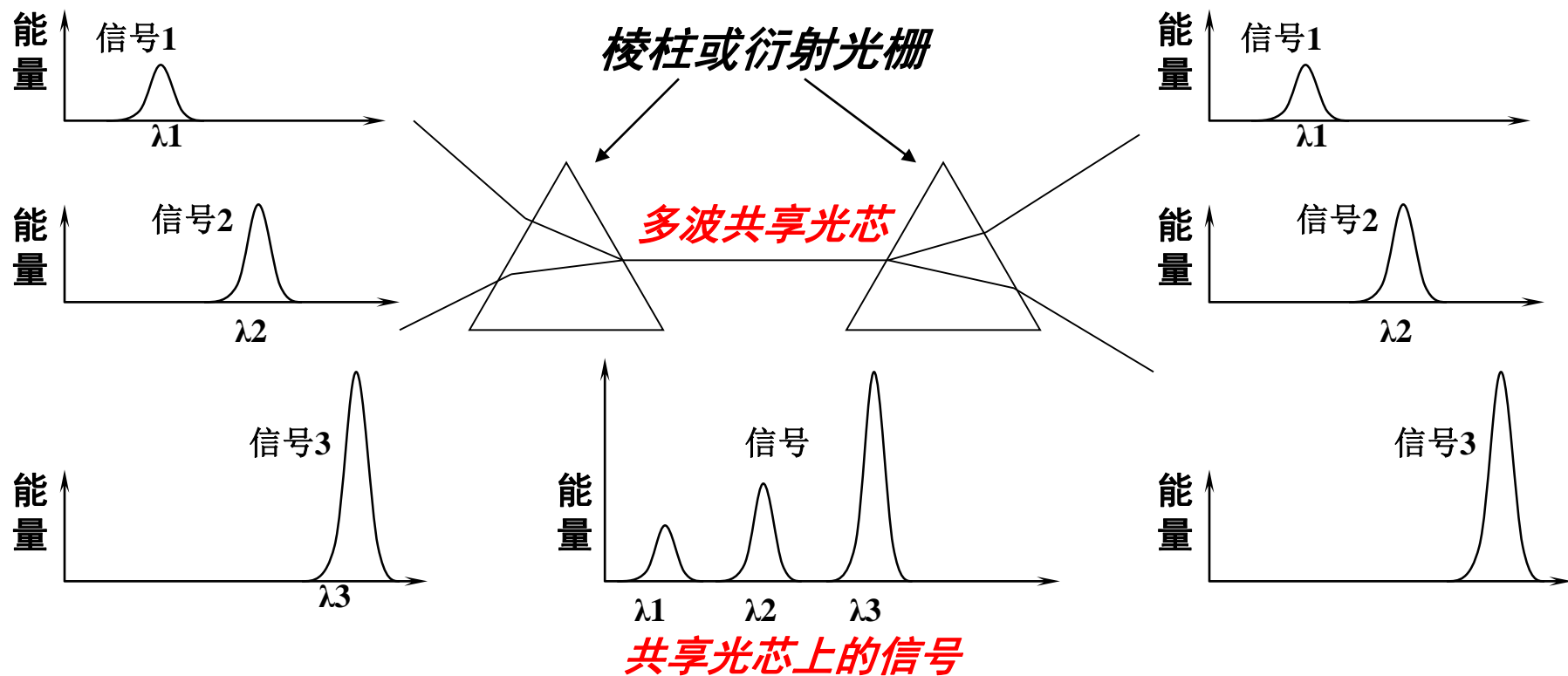


统计时分复用: 每个STDM帧中的时隙小于集中器上的用户数, 本例=2<4, 各用户有数据后发往集中器的缓冲, 顺序扫描装帧, 没有就跳过。装满后发送出去

WDM--DWDM

45

- Dense Wavelength Division Multiplexing Access
- 1波长→channel. 分少→ CoarseWDM, 高密度→DenseWDM
 - ♣ 是FDMA在光纤上的一个变种。因频率很高而用波长表示
 - ♣ 最初只能2路复用CWDM→80路而称密集波分复用DWDM



1.2.5 差错控制技术

46

- 什么是差错控制？
 - ▣ 在通信过程中，发现、检测差错并进行纠正
- 为何要进行差错控制？
 - ▣ 不存在理想的信道→传输总会出错
- 与语音、图像传输不同，计算机通信要求极低的差错率。
- 产生差错的原因：
 - ▣ 信号衰减和热噪声
 - ▣ 信道的电气特性引起信号幅度、频率、相位的畸变；
 - ▣ 信号反射，串扰；
 - ▣ 冲击噪声，闪电、大功率电机的启停等。

- 基本思想：发方编码、收方检错，能纠则纠，不能则重传
- 基本方法：收方进行差错检测，并向发送方应答，告知是否正确接收。
- 差错控制技术：自动请求重传ARQ：Automatic Repeat Request
 - 停等 ARQ
 - 每发送一帧就需要一个应答帧
 - 只重传刚才出错的帧
 - Go-back-N ARQ
 - 每发送N帧需要一个应答帧
 - 需重传前面 $(N-i+1)$ 帧 $(0 \leq i \leq N)$
 - 选择重传 ARQ
 - 每发送N帧需要一个应答帧
 - 只重传出错的帧

检验纠错基本思想与方法

48

- 任何检验纠错技术的基本思想
 - ▣ 加入冗余信息到帧中去（极端：两份拷贝）
 - ▣ 一般为 n 位信息加入 $k \ll n$ 比特冗余，例如12000bits(1500bytes)的报文仅需要32比特CRC码
- 纠错码主要有编码方法：
 - ▣ 奇偶校验（Parity Checking）
 - ▣ 循环冗余校验（CRC, Cyclic Redundancy Check）
 - ▣ 校验和：Check sum

习题

49

英文版（4rd）第2章

□ 第3题

- 3 Show the 4B/5B encoding, and the resulting NRZI signal, for the following bit sequence:

1101 1110 1010 1101 1011 1110 1110 1111

□ 第7题（HDLC）

- 7 Suppose the following sequence of bits arrive over a link:

011010111110101001111111011001111110

Show the resulting frame after any stuffed bits have been removed. Indicate any errors that might have been introduced into the frame.

习题

50

英文版（4rd）第二章

□ 第9题

9 For each of the following framing protocols, give an example of a byte/bit sequence that should never appear in a transmission:

(a) BISYNC.

(b) HDLC.

□ 第10题

★ 10 Assume that a SONET receiver resynchronizes its clock whenever a 1 bit appears; otherwise, the receiver samples the signal in the middle of what it believes is the bit's timeslot.

(a) What relative accuracy of the sender's and receiver's clocks is required in order to receive correctly 48 zero-bytes (one ATM AAL5 cell's worth) in a row?

(b) Consider a forwarding station A on a SONET STS-1 line, receiving frames from the downstream end B and retransmitting them upstream. What relative accuracy of A's and B's clocks is required to keep A from accumulating more than one extra frame per minute?