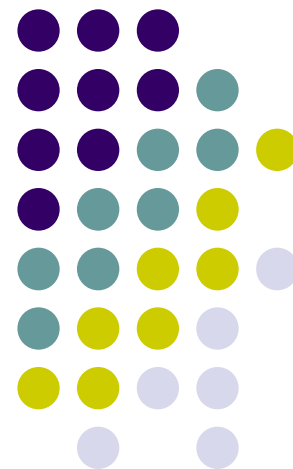


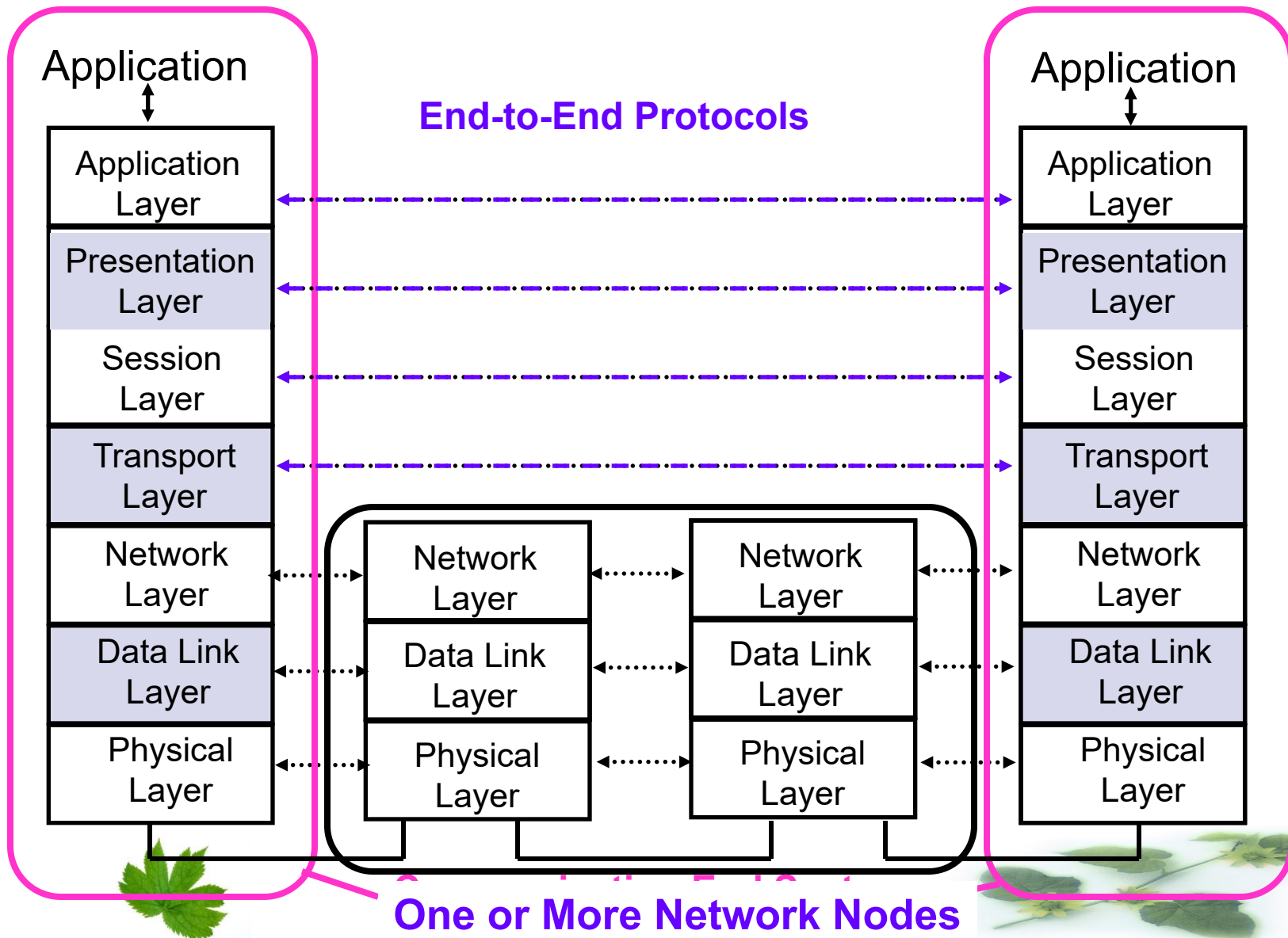
第四章 数据传输基础



- 4.1 信息的数字表示
- 4.2 数字通信
- 4.3 线路编码
- 4.4 调制解调
- 4.5 传输媒介
- 4.6 差错检测和差错校正（第五章讲述）



One or More Network Nodes





物理层

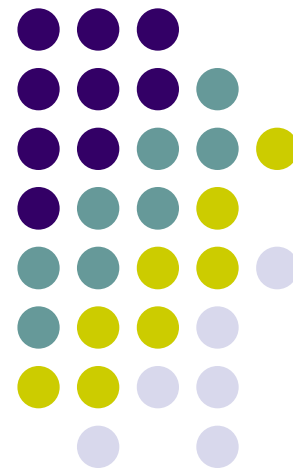
- 数据比特的传输
- 通信链路物理特性的定义和说明
- Ethernet, DSL, cable modem, telephone modems...
- 双绞线、同轴电缆、光纤、RF、红外...



第四章

数字传输基础

信息的数字表示





信息块 vs. 信息流

信息块 (block)

- 信息存在于单一块中
- Size = Bits / block
或 bytes/block
 - 1 kbyte = 2^{10} bytes
 - 1 Mbyte = 2^{20} bytes
 - 1 Gbyte = 2^{30} bytes

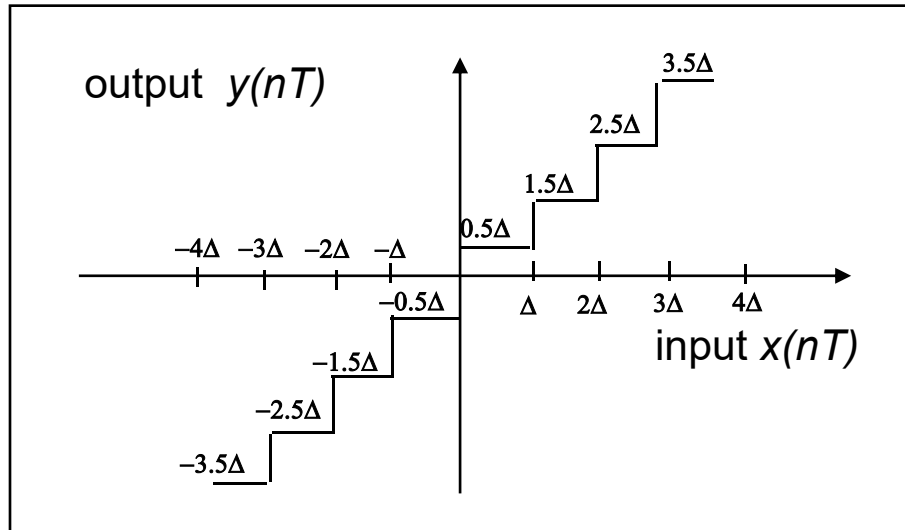
信息流

- 信息是连续的流
- Bit rate = bits / second
 - 1 kbps = 10^3 bps
 - 1 Mbps = 10^6 bps
 - 1 Gbps = 10^9 bps



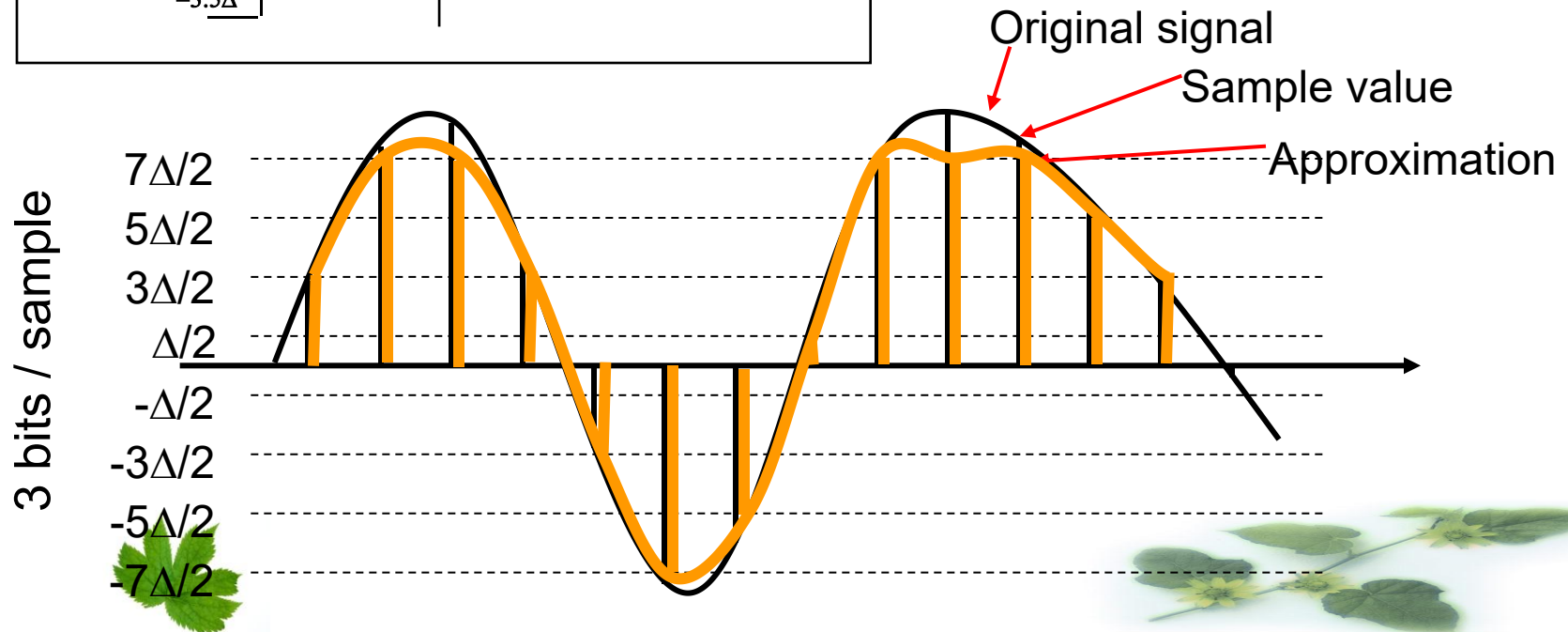


模拟信号采样量化



Quantizer maps input into closest of 2^m representation values

Quantization error:
"noise" = $x(nT) - y(nT)$





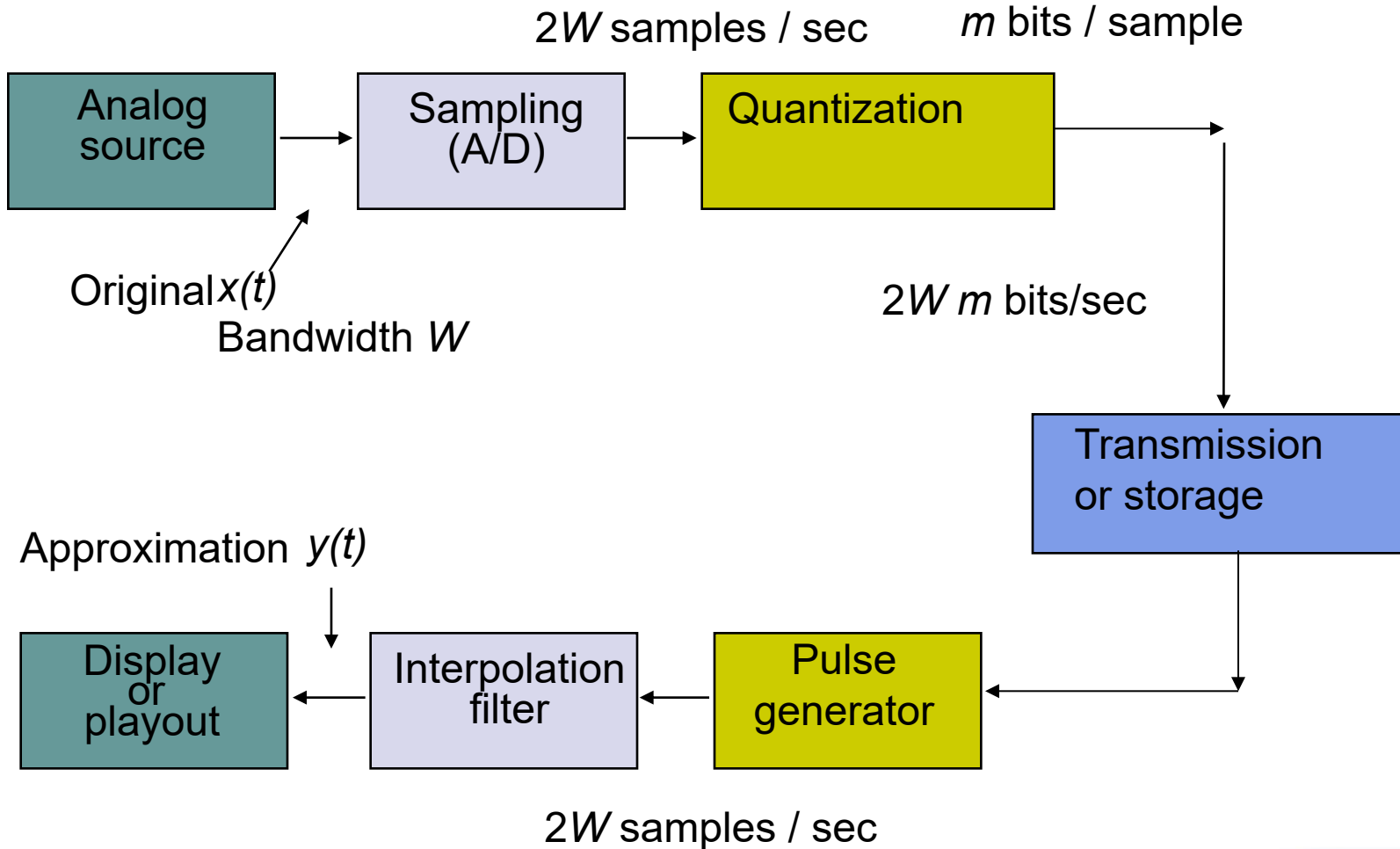
数字信号的速率

- 模拟信号带宽 W_s Hertz:
 - 带宽越高 → 采样速率越高
 - 最小采样速率 = $2 \times W_s$
- 精度：误差的范围
 - 越高的精度
 - 相邻值之间的间隔越小
 - 每个采样需要的比特数也就越多





模拟信息数字传输





两个例子：电话语音& CD音频

电话语音

- $W_s = 4 \text{ kHz} \rightarrow 8000$ samples/sec
- 8 bits/sample
- $R_s = 8 \times 8000 = 64 \text{ kbps}$
- 蜂窝电话采用声码器压缩 8-12 kbps

CD 音频

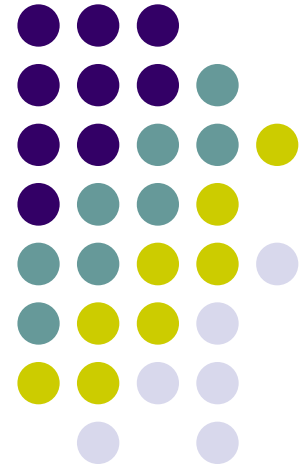
- $W_s = 22 \text{ kHz} \rightarrow 44000$ samples/sec
- 16 bits/sample
- $R_s = 16 \times 44000 = 704 \text{ kbps}$
- MP3 采用压缩方法：每个音频信道达到50 kbps



Chapter 4

Communication Networks and Services

数字通信





传输系统



Transmitter:

- 将信息转换为适于信道传输的信号
- 往通信信道中注入能量

Receiver:

- 从信道中接收能量
- 将接收到的信号转换成适于传递给用户的形式

信号带宽：传输信息越快，信号变化越剧烈

信道带宽：信道对信号传输的速率有限制





传输损耗



通信信道

- 铜线对
- 同轴电缆
- 电磁波
- 光纤
- 可见光通信
- 红外



传输损耗

- 信号衰减
- 信号失真
- 噪声
- 信号间干扰





模拟长距离通信



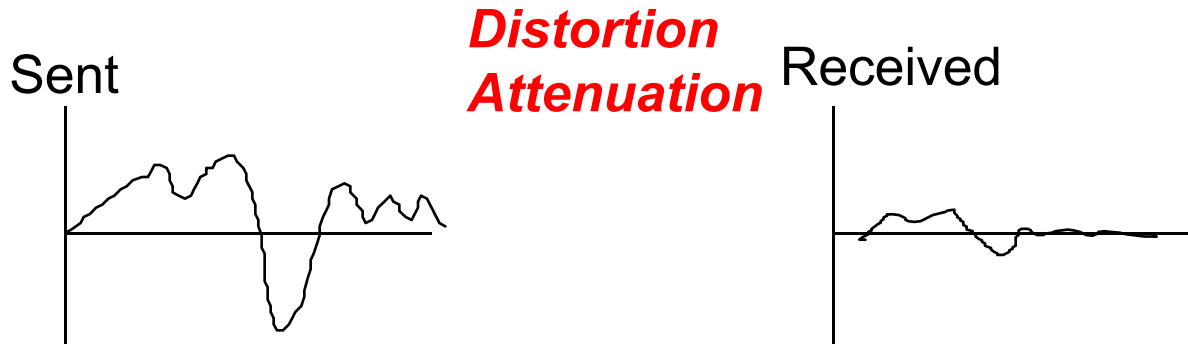
- 中继器repeater恢复信号
 - 失真不能完全消除
 - 噪声和干扰只能部分消除
- 信号质量随着中继器的增多而衰减
- 距离受限



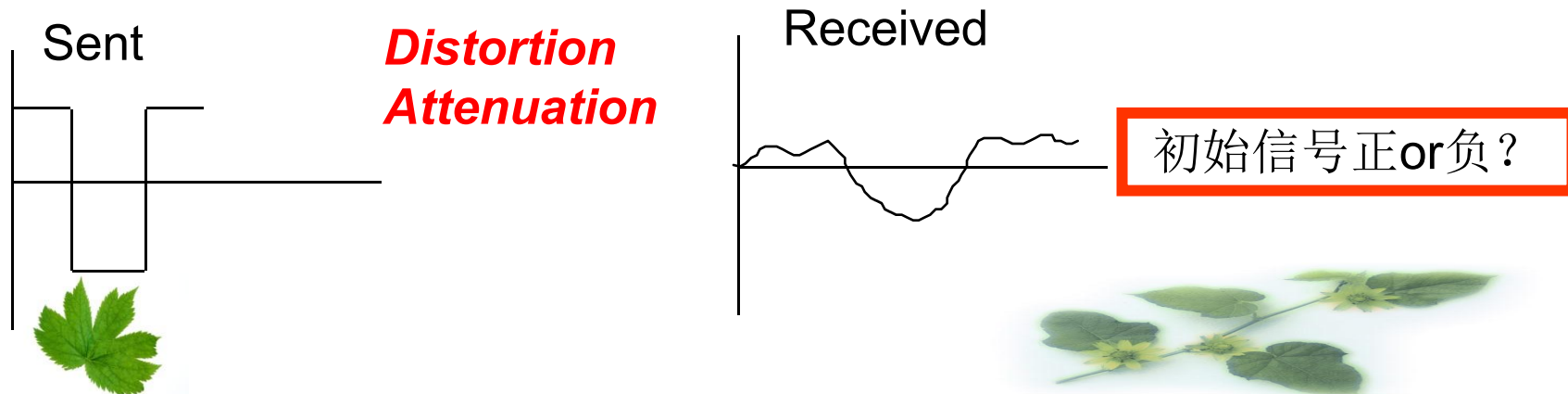


模拟 vs. 数字传输

模拟传输: 所有的细节都要精确复制



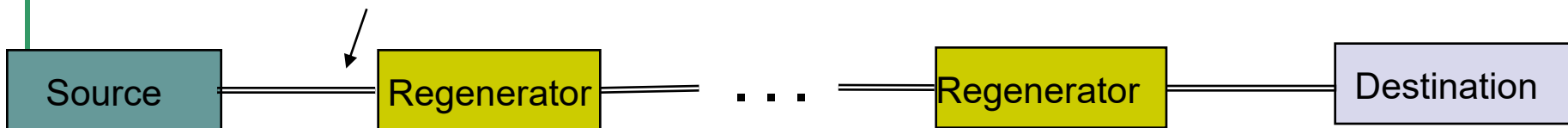
数字传输: 只需要再生离散电平





数字长距离通信

Transmission segment

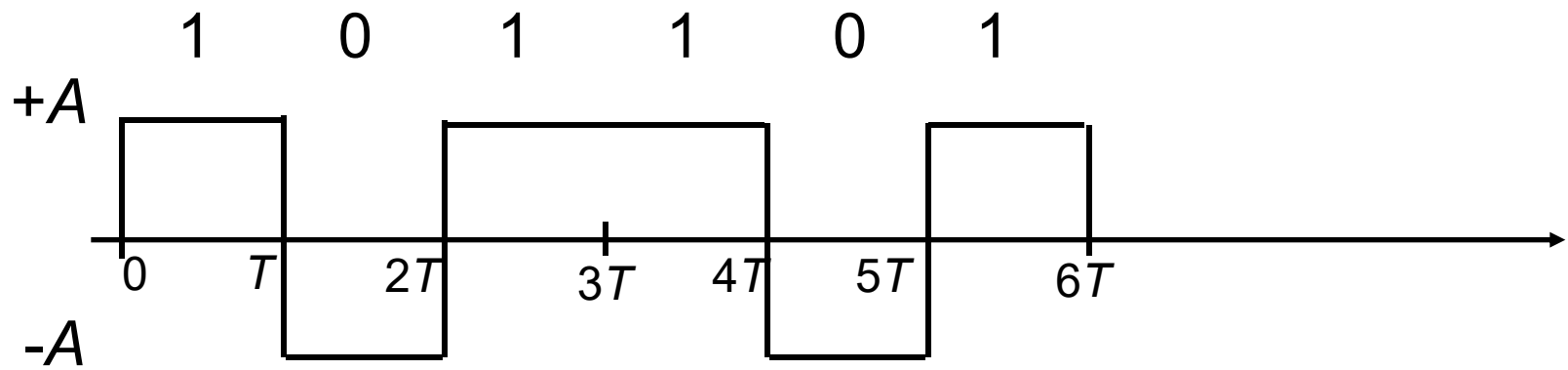


- 再生器恢复初始数字序列，并重新发送
- 出错的可能性很小
- 再生的数据和初始数据一样，没有传输损耗的累积
 - 低功耗、长距离、造价低
 - 监控、复用、编码、加密、协议...，各种想象都可以有





二进制数字信号



$$\text{Bit rate} = 1 \text{ bit} / T \text{ seconds}$$

对于通信媒介:

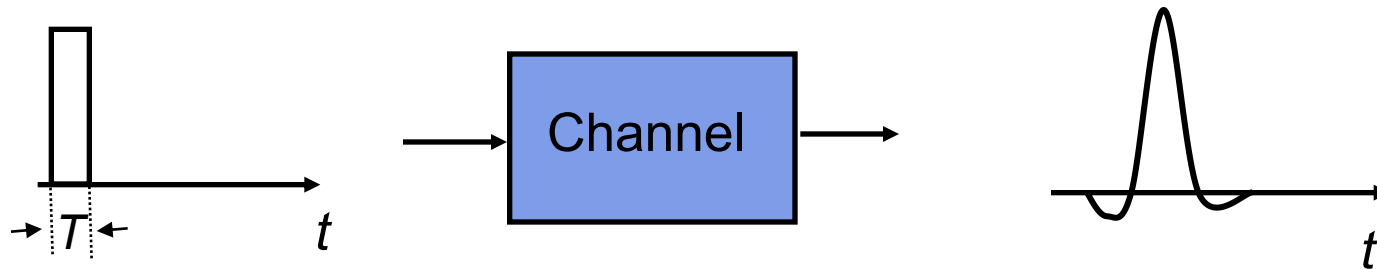
- 如何增加传输速度?
- 如何可靠通信?
- 速度和可靠性关系如何?





脉冲传输速率

- 最大化脉冲传输速率就是要使得 T 尽可能小



- 没有符号间干扰的最大脉冲频率:
 - 低通信道: $2 \times W_c$ pulses/second
 - 带通信道: W_c pulses/second
 - W_c 为信道带宽





多级脉冲传输

- 低通信道：

- 如果脉冲幅度是 $-A$ or $+A$, 则每个脉冲表示 1bit,

$$\text{Bit Rate} = 1 \text{ bit/pulse} \times 2W_c \text{ pulses/sec} = 2W_c \text{ bps}$$

- 如果脉冲幅度是 $\{-A, -A/3, +A/3, +A\}$,

则 bit rate 是 $2 \times 2W_c \text{ bps}$

- 对于 $M = 2^m$ 幅度级,

$$\text{Bit Rate} = m \text{ bits/pulse} \times 2W_c \text{ pulses/sec} = 2mW_c \text{ bps}$$

- 带通信道，则bit率减半





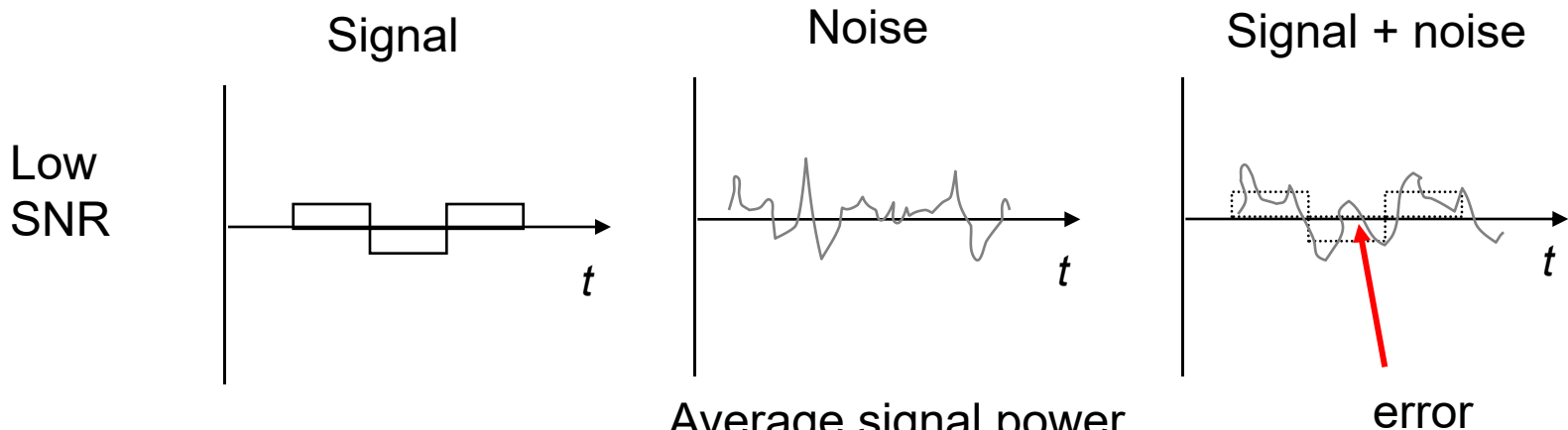
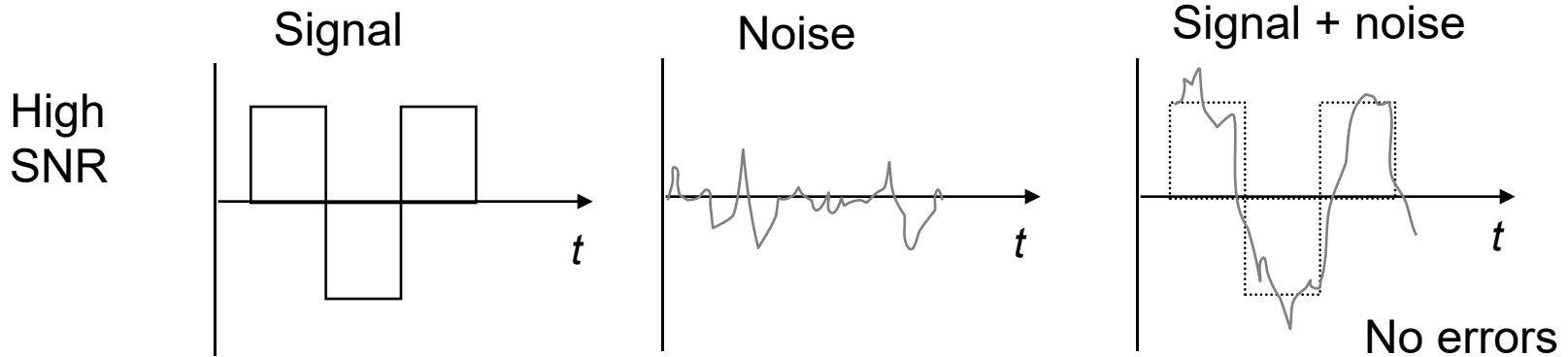
噪声和可靠通信

- 噪声不可避免，无所不在
- 噪声叠加接收信号使得测量精确性降低
- 误比特率(**BER**) 随着信噪比降低而增加
- 噪声限制了脉冲传输时的幅度级数
- 幅度级数越多，脉冲间的压差越小，对噪声的敏感性越高





信噪比 (Signal-to-Noise Ratio)



$$\text{SNR} = \frac{\text{Average signal power}}{\text{Average noise power}}$$

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \text{SNR}$$





香农定理

$$C = W_c \log_2 (1 + SNR) \text{ bps}$$

- 如果信息速率 $R < C$ ，任意可靠的通信是可能的
- 如果 $R > C$ ，则任意可靠通信不可能
- “任意可靠”是指通过提供足够复杂的编码，BER可以任意小
- C 用来测量系统设计的性能，越接近越好





一个例子

- 电话信道香农限:

$$W_c = 3400 \text{ Hz and } SNR = 10000$$

- 则:

$$\begin{aligned} C &= 3400 \log_2 (1 + 10000) \\ &= 3400 \log_{10} (10001) / \log_{10} 2 = 45200 \text{ bps} \end{aligned}$$

$$SNR = 10000$$

相当于 $SNR \text{ (dB)} = 10 \log_{10}(10000) = 40 \text{ dB}$





香农限的理论扩展

$$C_{\text{sum}} \Leftrightarrow \sum_{\text{Cells}} \sum_{\text{Channels}} B_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{I_i + N_i} \right)$$

增加覆盖

增加信道

增加带宽

增加SINR

覆盖增强技术

频效提升技术

频谱拓展技术

能效提升技术

超密异构组网
D2D、M2M

大规模天线、FBMC
、空间调制

认知无线电、
毫米波、可见光

绿色通信
干扰管理

多址技术、用户调度、资源分配、用户/网络协作





信道频带和带宽

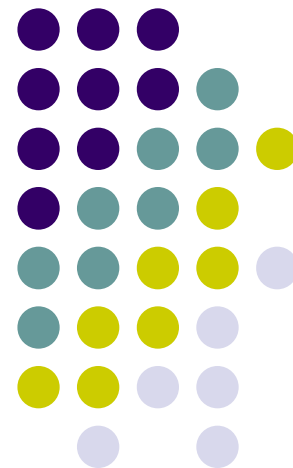
Channel	Bandwidth	Bit Rates
电话语音	3 kHz	33 kbps
铜线对	1 MHz	1-6 Mbps
同轴电缆	500 MHz (6 MHz 信道)	30 Mbps/ channel
5 GHz radio (IEEE 802.11)	300 MHz (11信道)	54 Mbps / channel
光纤	许多THz	40 Gbps / wavelength



Chapter 4

数字传输基础

线路编码





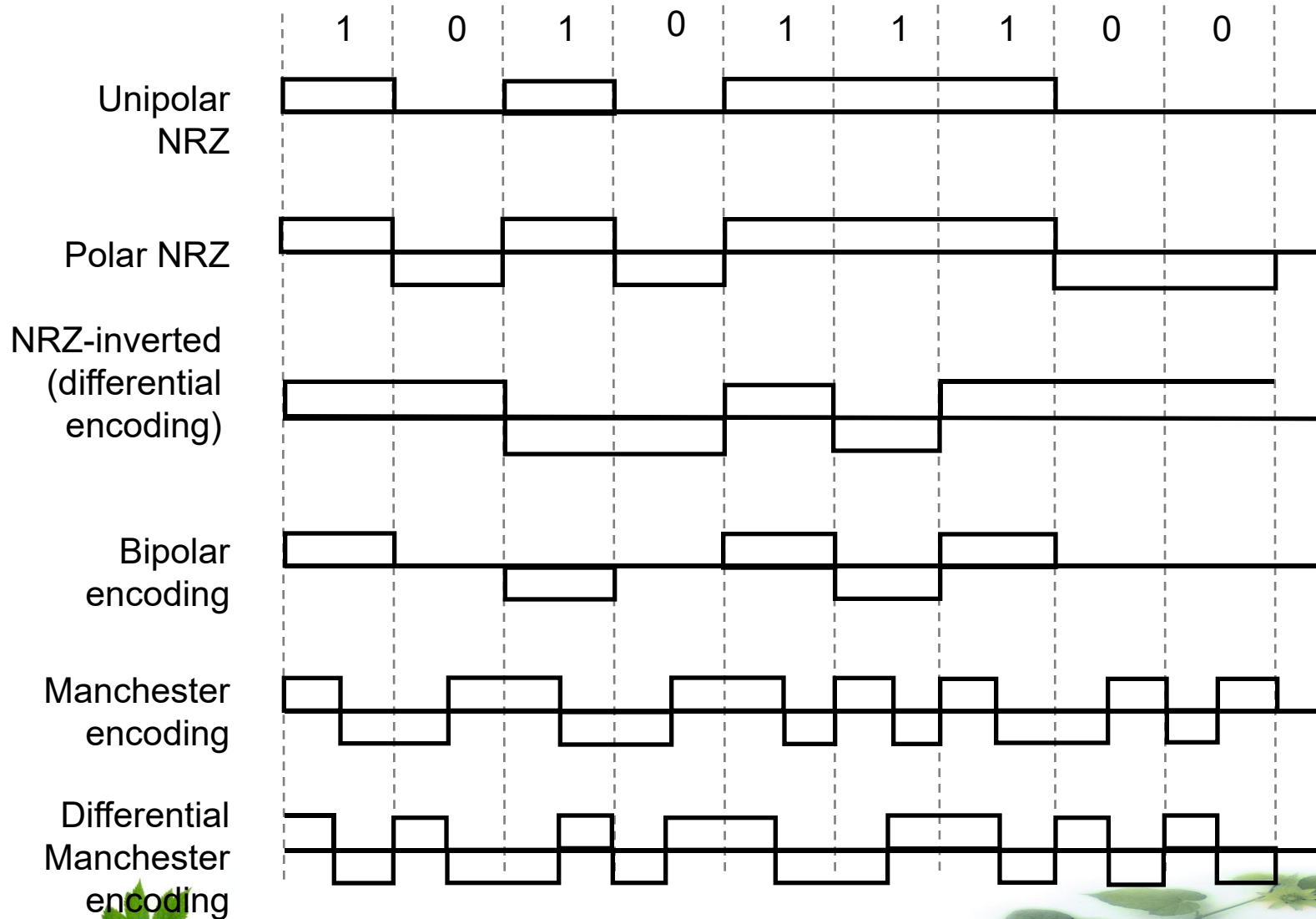
线路编码

- 二进制信息序列映射为数字信号
 - 如, “1” \rightarrow $+A$ 电平脉冲; “0” \rightarrow $-A$ pulse
- 线路编码的要求 (考虑因素):
 - 低频分量: 信道传输低频信号能力一般比较低
 - 长时的 $+A$ 或 $-A$ 相当于直流, 会被信道阻塞
 - 波形中的低频分量需要消除
 - 发送功率: 功率越大, 钱花的越多
 - bit定时: 信号的跃变有助于定时恢复
 - 带宽效率: 跃变越多, 带宽浪费越大
 - 复杂性
 - 差错检测能力





线路编码实例

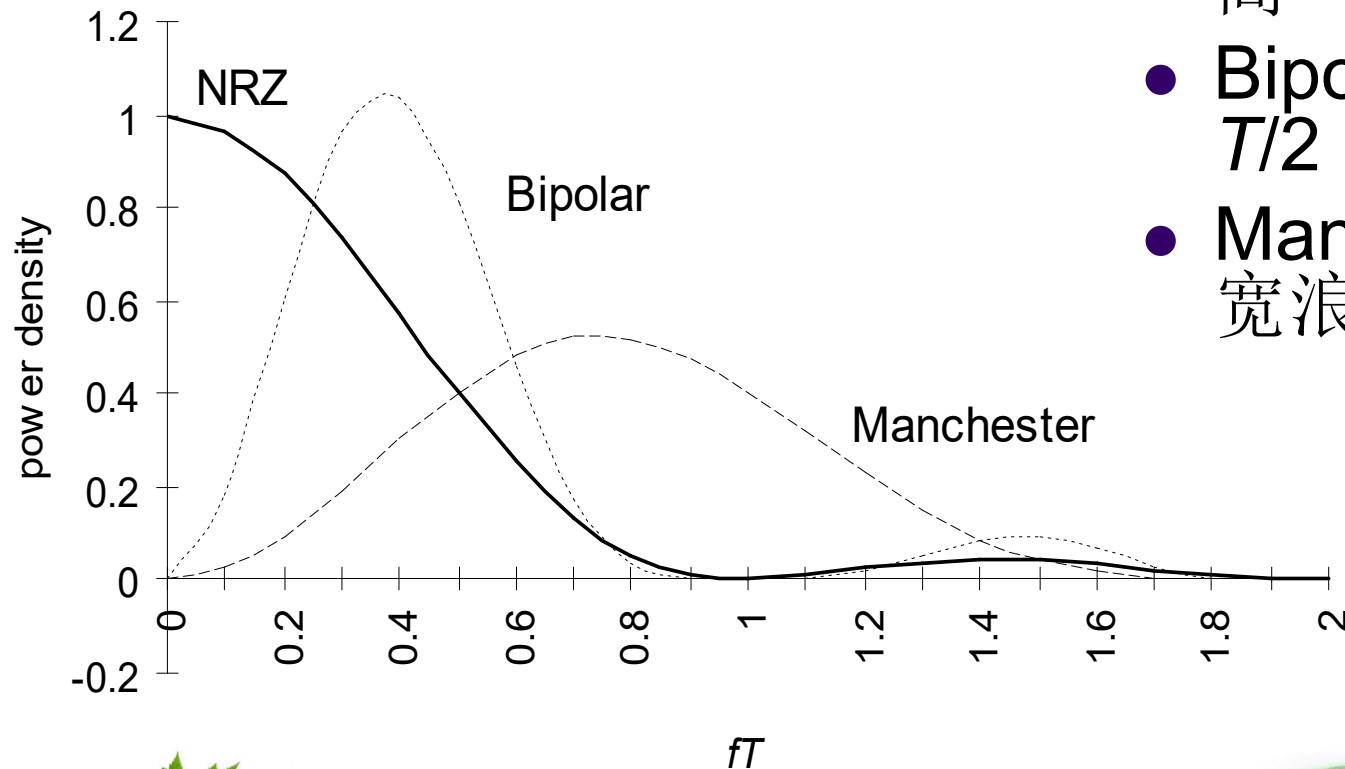




Spectrum of Line codes

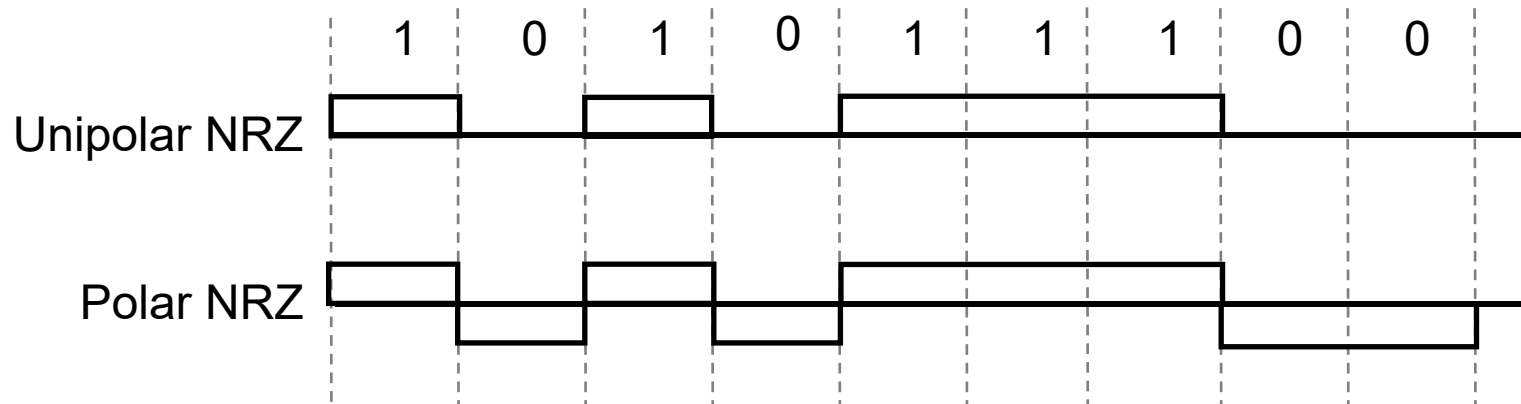
- 假定1s & 0s 独立且等概率

- NRZ 低频含量高
- Bipolar 拥挤在 $T/2$
- Manchester 带宽浪费严重





单极性& 双极性不归零编码(NRZ)



单极性NRZ

- “1” maps to +A pulse
- “0” maps to no pulse
- 平均功率高

$$0.5 \cdot A^2 + 0.5 \cdot 0^2 = A^2/2$$

- 长 A or 0
 - 定时性能差
 - 低频分量
- Simple



Polar NRZ (bipolar?)

- “1” maps to +A/2 pulse
- “0” maps to -A/2 pulse
- 平均功率低

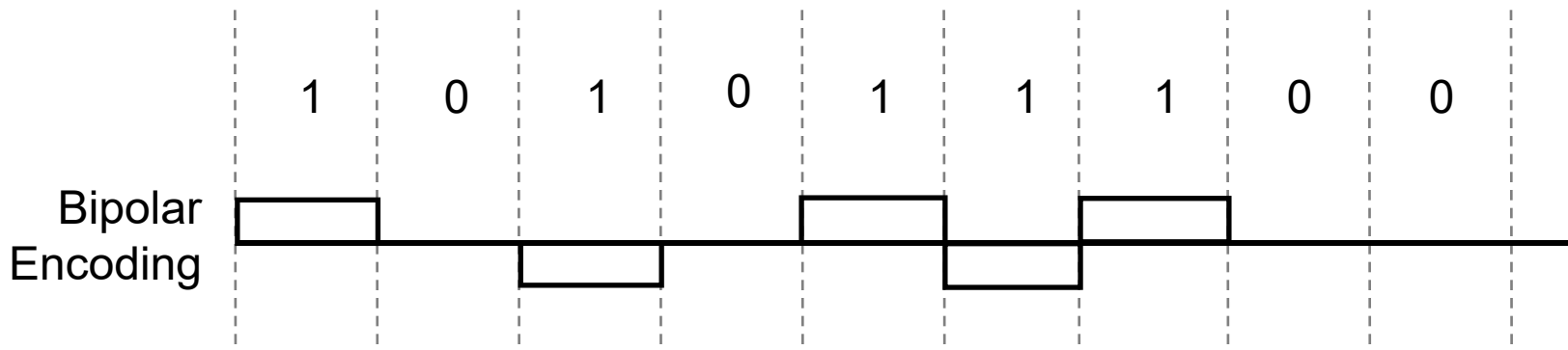
$$0.5 \cdot (A/2)^2 + 0.5 \cdot (-A/2)^2 = A^2/4$$

- 长 +A/2 或 -A/2
 - 定时性能差
 - 低频分量
- Simple





双极性编码 (Bipolar Code)

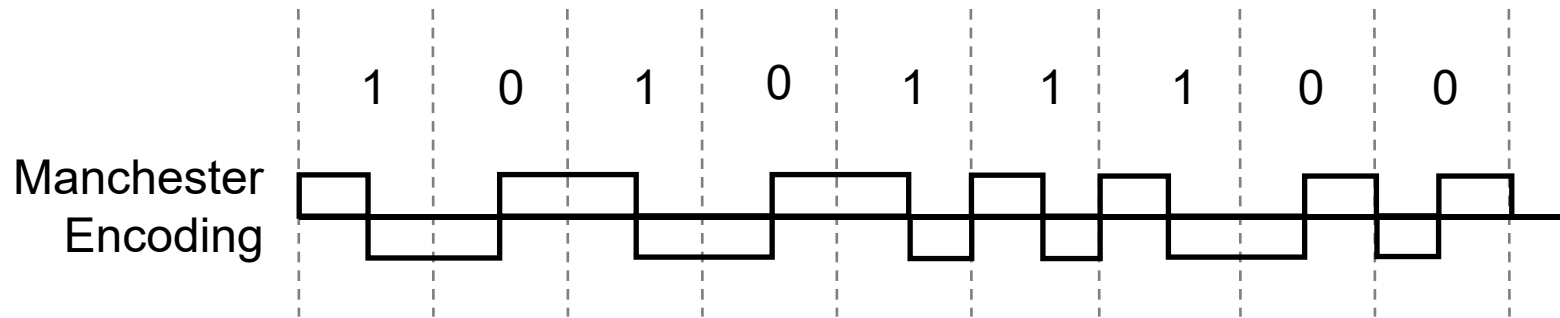


- 三个信号等级: $\{-A, 0, +A\}$
- “1” 交替映射到 $+A$ or $-A$
- “0” 映射到 0 电平
 - 低频分量小: 1 的 +、- 脉冲匹配
- 连续的 1 序列编码为方波
 - 频谱集中在 $T/2$
- 长 0 时, 接收方会失去同步
- 零替换码: Zero-substitution codes





曼彻斯特码 & $mBnB$ 码



- 首 $T/2$ “1” $\rightarrow A/2$, 后 $T/2 -A/2$
- 首 $T/2$ “0” $\rightarrow -A/2$, 后 $T/2 A/2$
- 每个比特都在中间有个跃变
 - 定时性能好
 - 带宽*2
- 易于实现
- 用于10-Mbps 以太网 & 其它局域网标准
- $mBnB$ line code
- m bits $\rightarrow n$ bits
- 曼彻斯特编码是1B2B码
- 4B5B码用于FDDI
- 8B10b 用于Gigabit Ethernet
- 64B66B 用于10G Ethernet (以太网)





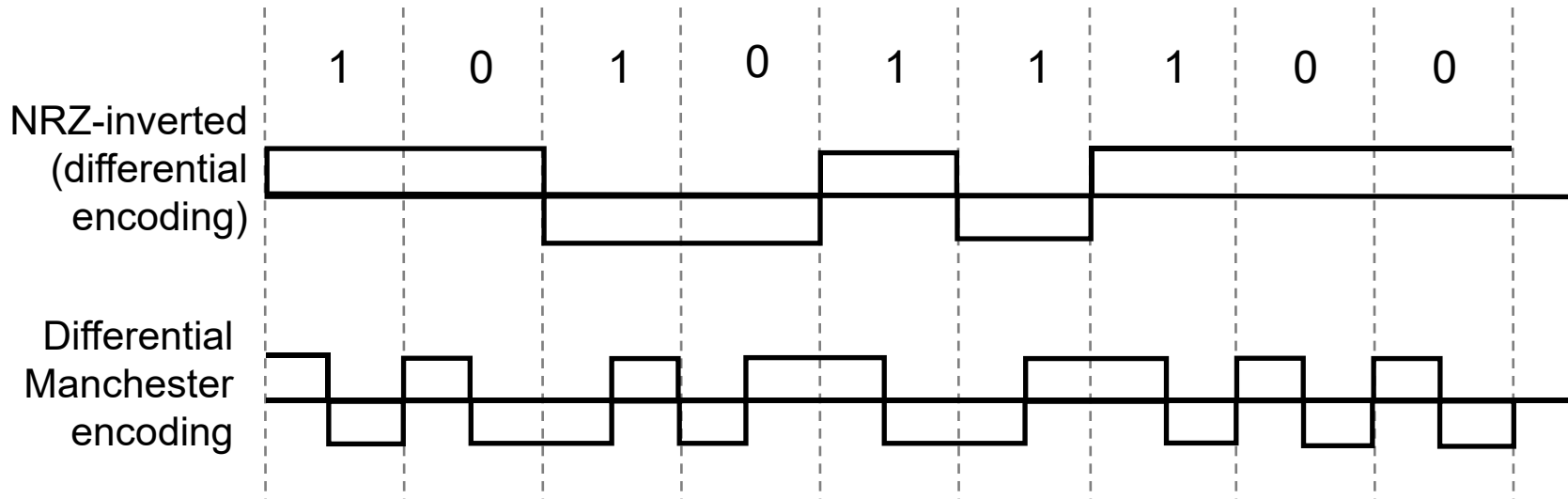
4B5B codes

十六进制数	4位二进制数	4B/5B编码	十六进制数	4位二进制数	4B/5B编码
0	0000	11110	8	1000	10010
1	0001	01001	9	1001	10011
2	0010	10100	A	1010	10110
3	0011	10101	B	1011	10111
4	0100	01010	C	1100	11010
5	0101	01011	D	1101	11011
6	0110	01110	E	1110	11100
7	0111	01111	F	1111	11101





差分编码 (Differential Coding)



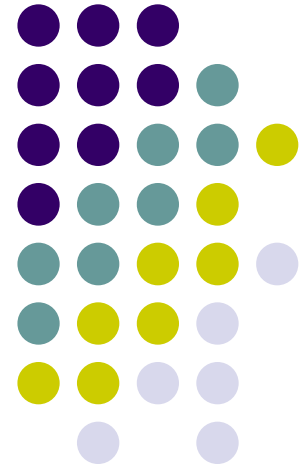
- 极性反转 $+A$ 变成 $-A$ 或相反
- 对于极性反转错误，差分线路编码提供了鲁棒性
- “1” 映射成跃变
- “0” 保持不变
- 带宽性能不变
- 差错成对出现
- 也用于 Manchester coding



Chapter 4

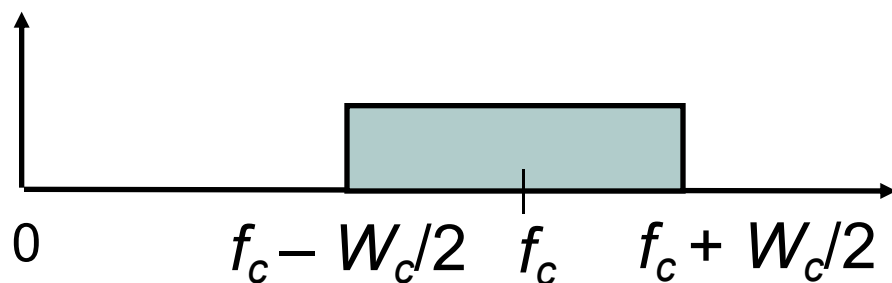
Digital Transmission Fundamentals

调制解调





带通信道



- 带通信道带宽为中心频率 f_c 附近的频带
- 数字调制器将信息嵌入到特定频率的载波中，以适应带通信道
- 如正弦载波，其频率 f_c 为带通信道的中心频率
- 调制器将信息嵌入到正弦载波中



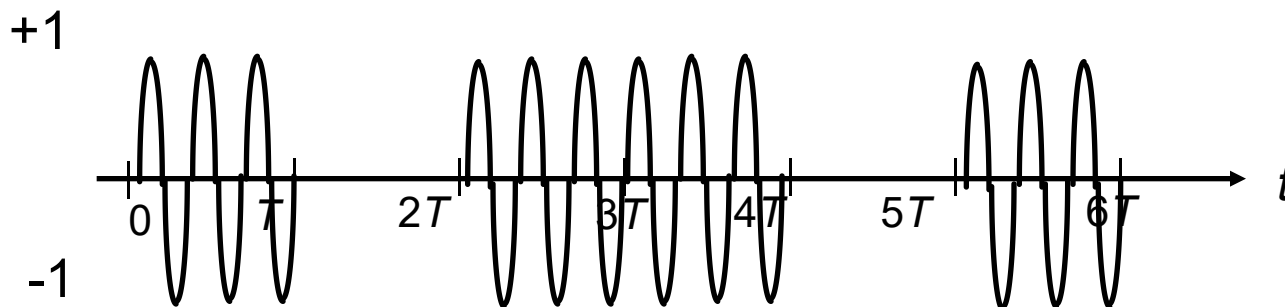


幅度调制和频率调制

Information

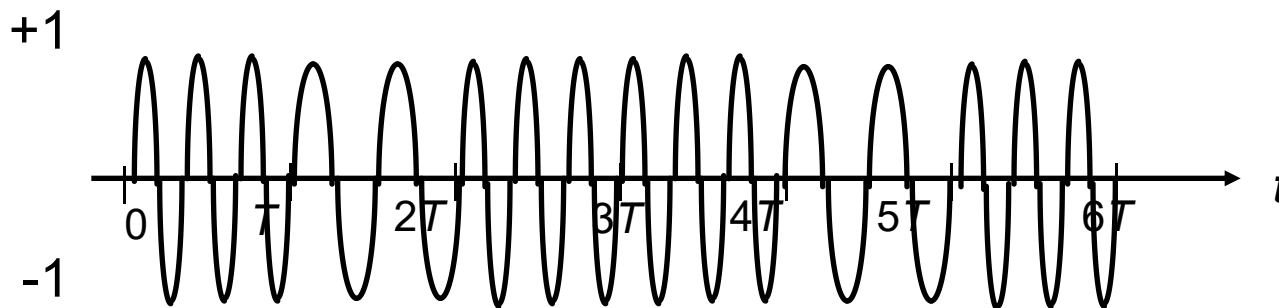
1 0 1 1 0 1

幅移键控



bit映射为正弦波的幅度: “1” 发送正弦波; “0” 不发送正弦波
解调器只需要辨别信号的有无

频移键控



bit映射为频率: “1” 发送频率 $f_c + \delta$; “0” 发送频率 $f_c - \delta$
解调器查找频率 $f_c + \delta$ 或 $f_c - \delta$ 的能量



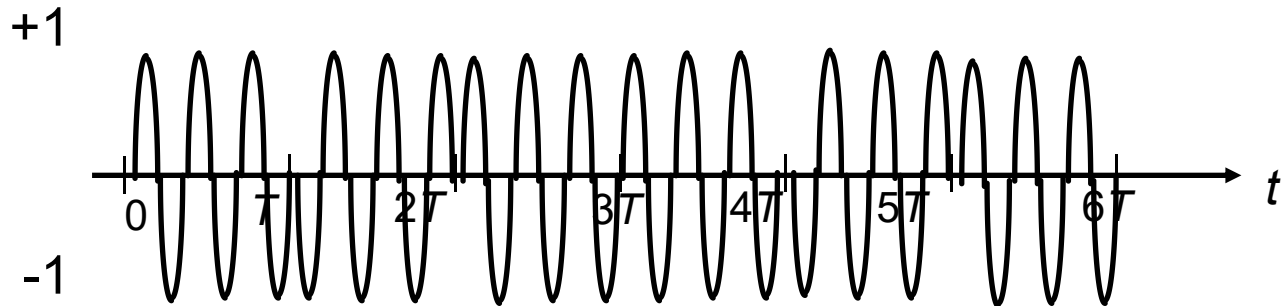


相位调制

Information

1 0 1 1 0 1

相移键控



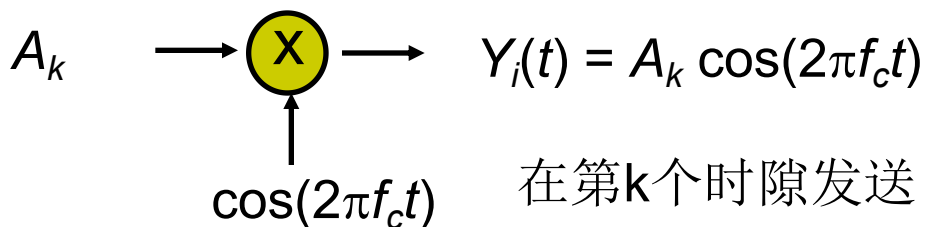
- bits映射为正弦波的相位:
 - “1” 发送 $A \cos(2\pi ft)$, i.e. phase is 0
 - “0” 发送 $A \cos(2\pi ft + \pi)$, i.e. phase is π
- 等价于 $\cos(2\pi ft)$ 与 $+A$ 或 $-A$ 相乘
 - “1” 发送 $A \cos(2\pi ft)$, i.e. multiply by 1
 - “0” 发送 $A \cos(2\pi ft + \pi) = -A \cos(2\pi ft)$, i.e. multiply by -1



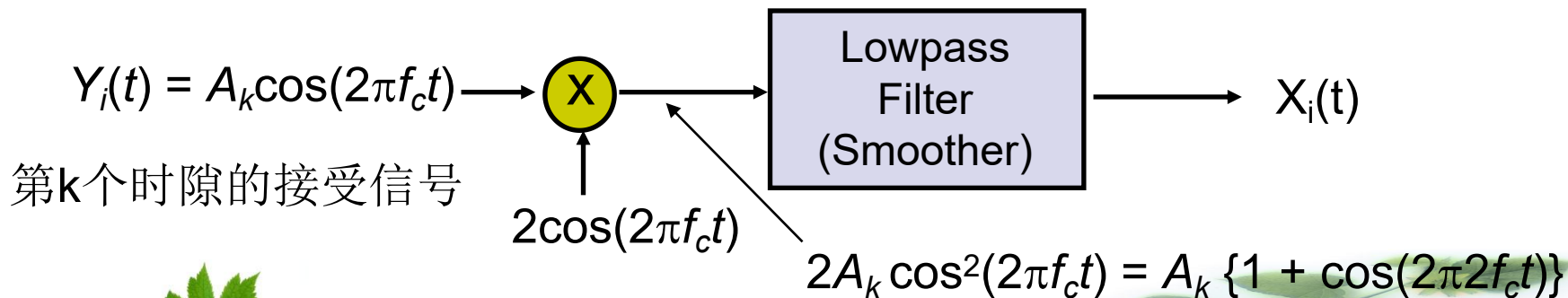


调制解调器

调制时，用 A_k 与 $\cos(2\pi f_c t)$ 相乘，持续 T 秒：



解调时，接收信号乘以 $2\cos(2\pi f_c t)$ ，持续 T 秒，再低通滤波：



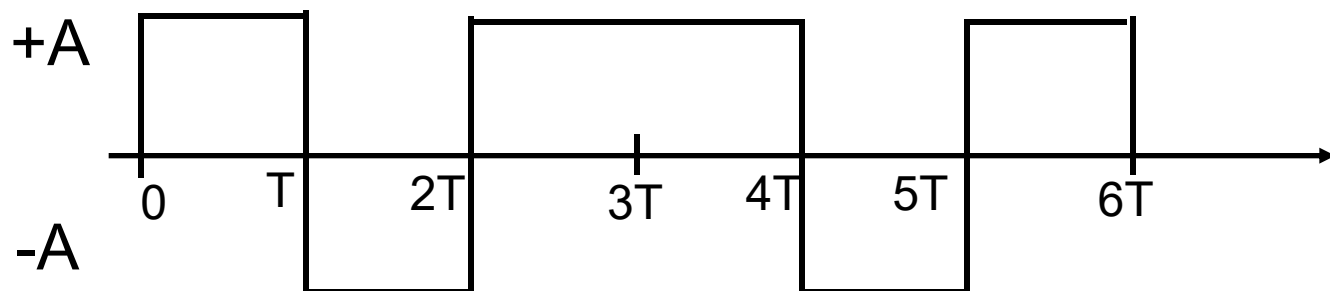


调制举例:

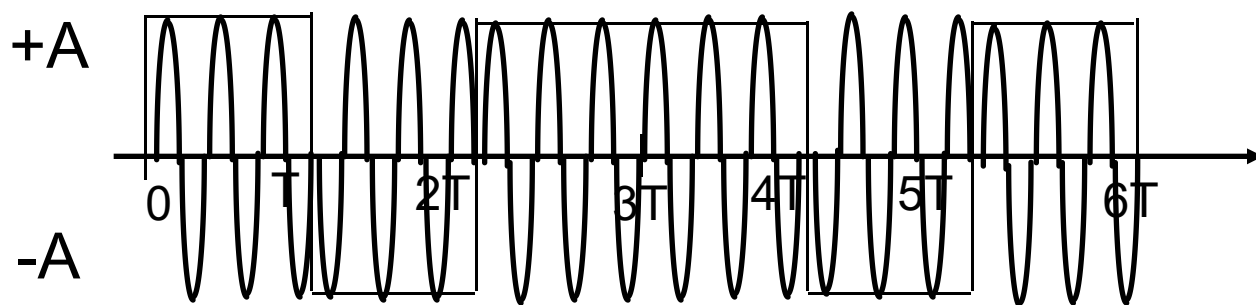
Information

1 0 1 1 0 1

基带信号



调制信号
 $x(t)$



$A \cos(2\pi ft)$

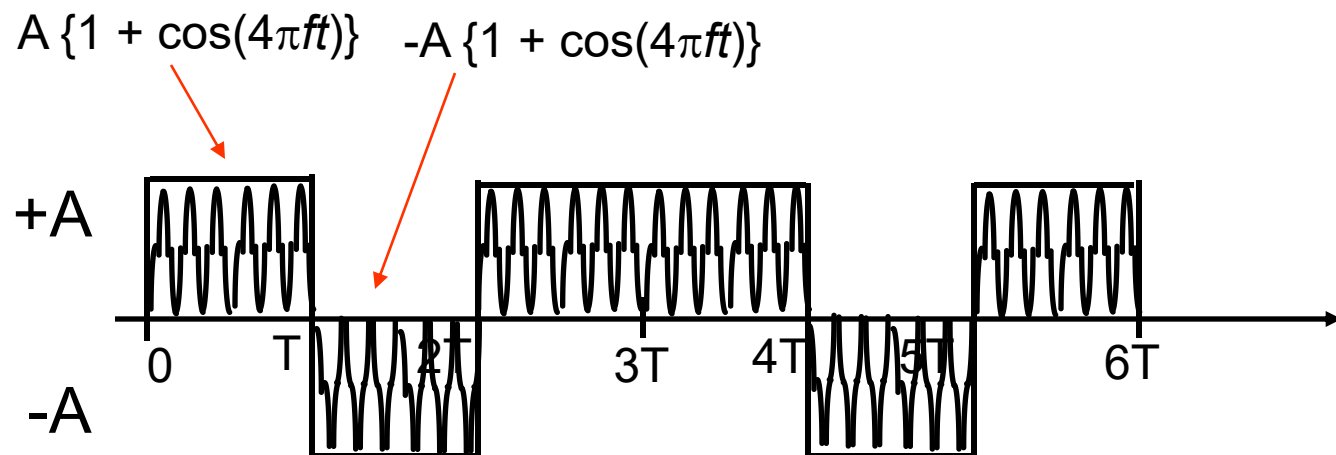
$-A \cos(2\pi ft)$



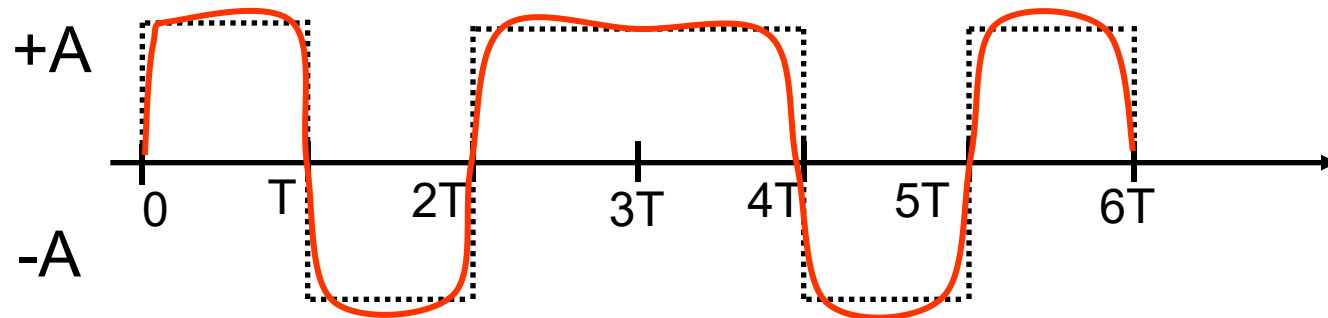


解调举例:

接收侧载波相乘后
 $x(t) \cos(2\pi f_c t)$



滤波后可识别
的基带信号



信息恢复

1 0 1 1 0 1

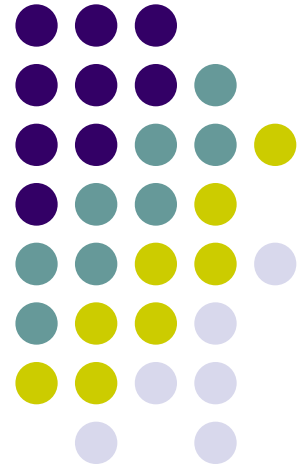


Chapter 4

Digital Transmission Fundamentals

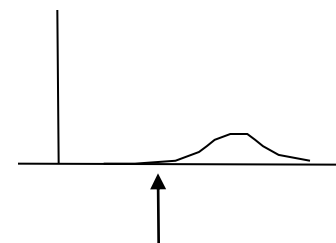


传输媒介





传输媒介的基本问题



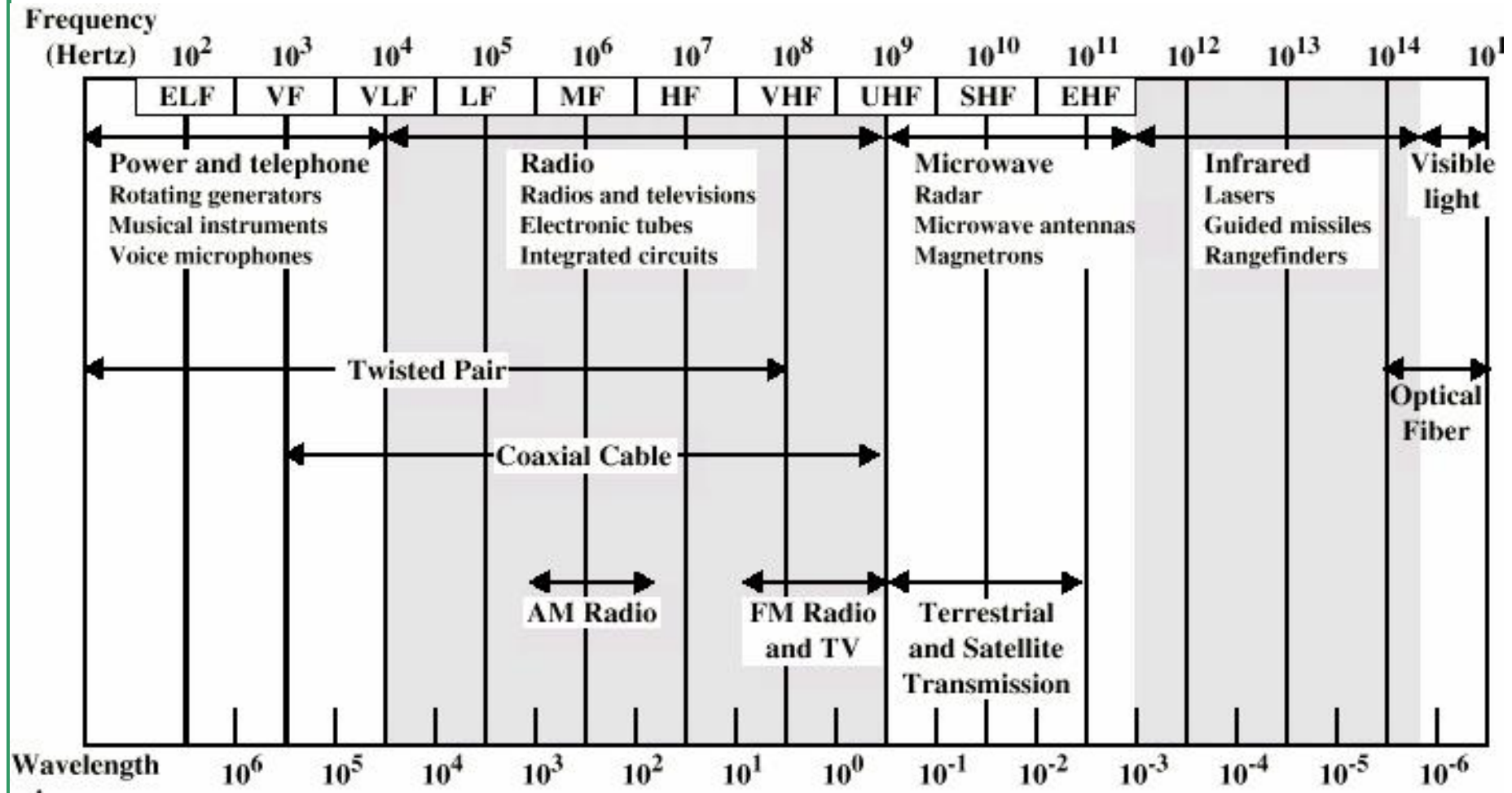
$$t = d/c$$

- 信息承载能力
 - 幅度相应和带宽
 - 噪声和干扰的敏感性
- 信号传播速度
 - 真空中: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - 铜线中: $v = 2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - 光纤中: $v = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$





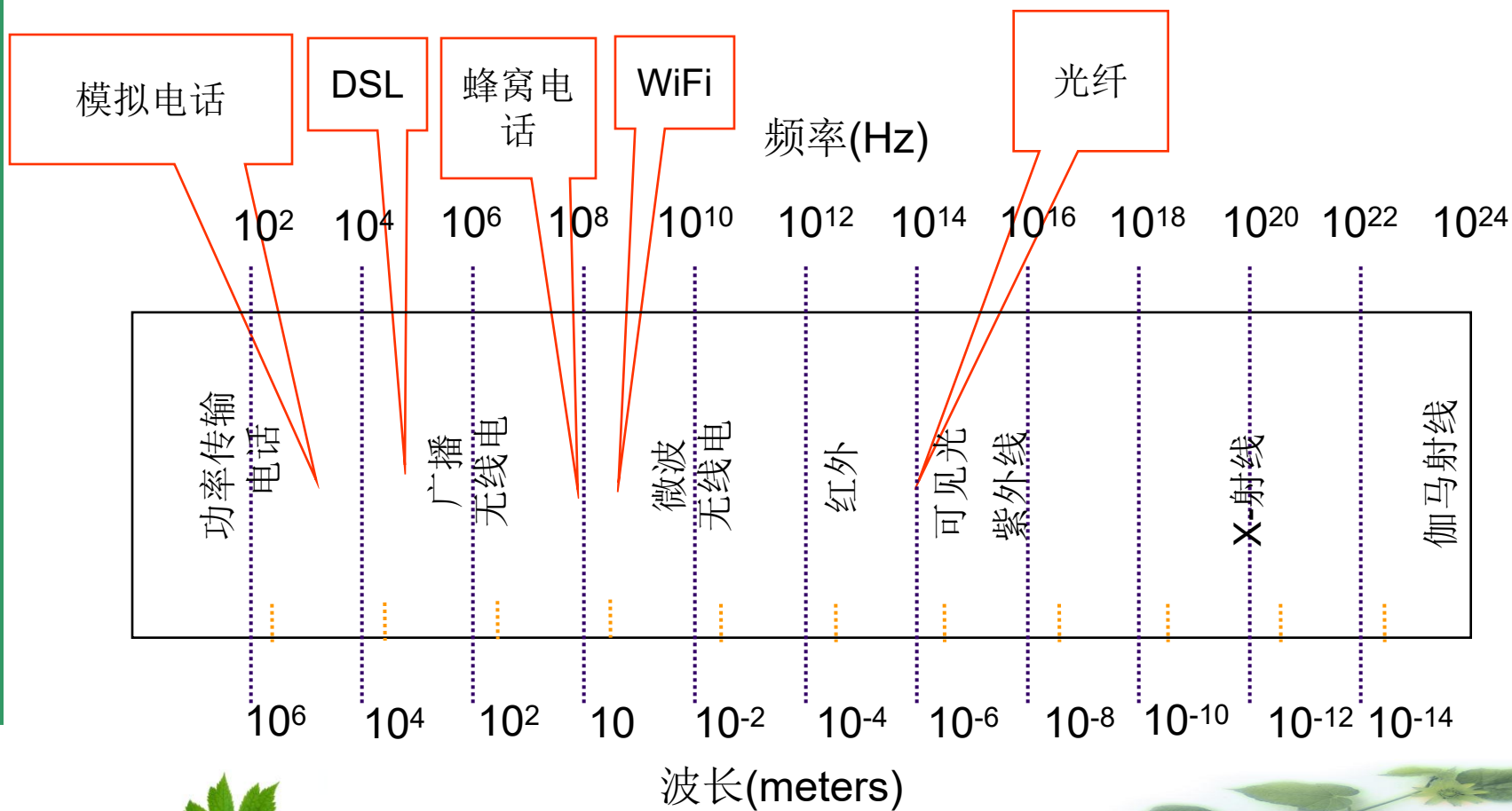
电磁谱





电磁谱

● 通信信号频率





无线媒介

- 信号能量空间传播, 方向受限
- 存在信号间干扰, 需要频谱规划
- 频谱资源有限
- 架构简单: 天线和发射机
- 网络 and 用户间不存在物理连接
- 用户具有移动性
- 水分子吸收电磁波
- 信号衰减





有线媒介

- 信号能量约束在传输媒介中
- 不同媒介间频谱复用
- 极高的频带
- 架构复杂：管道、导管、电杆、通行权等





衰减

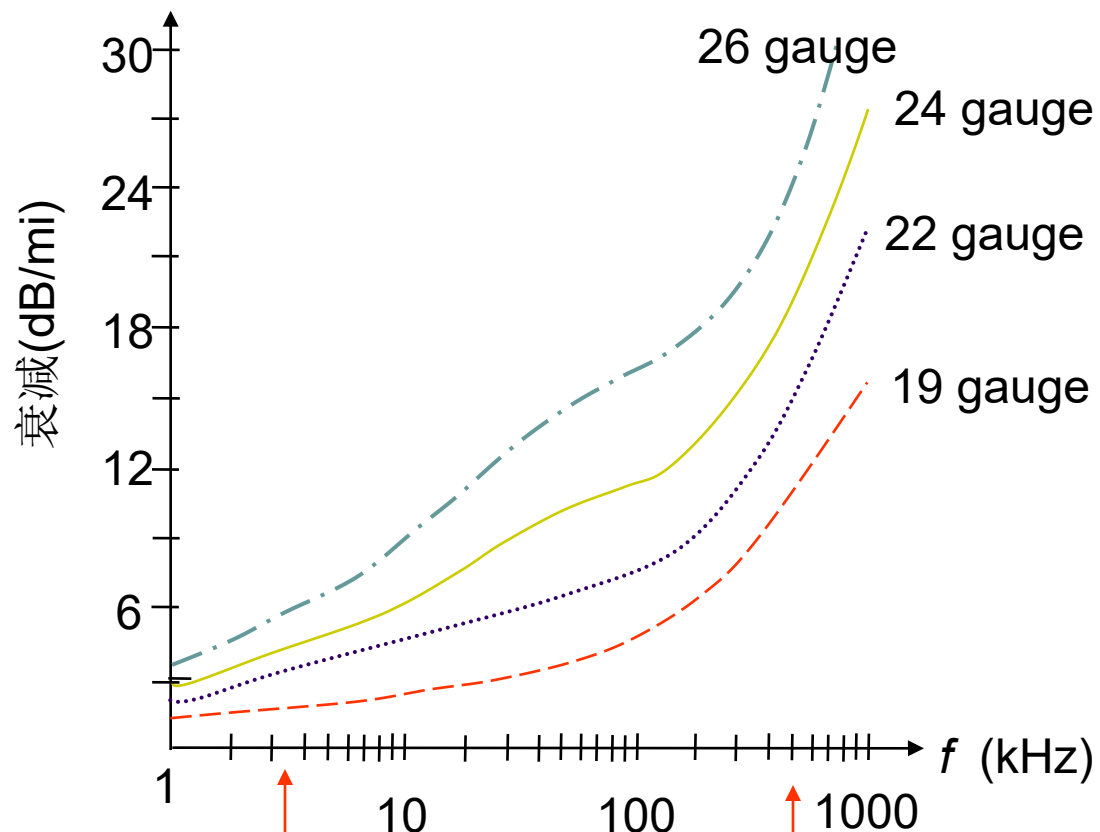
- 衰减因介质而异
- 有线媒体具有指数依赖性
 - d 米处的接收功率与 10^{-kd} 成比例
 - 衰减的分贝表示为: $\text{dB} = k d$, k 为dB/meter
- 无线媒体具有对数依赖性
 - d 米处的接收功率与 d^{-n} 成比例
 - Attenuation in dB = $n \log d$, 其中 n 是路径损耗指数; $n=2$ 是自由空间





双绞线对

- 两根绝缘铜线以规则的螺旋排列，以尽量减少干扰
- 低成本
- 从客户到中心局（CO）的电话用户环路



模拟电话
较低的衰减率

DSL较高的衰减率





双绞线对比特率

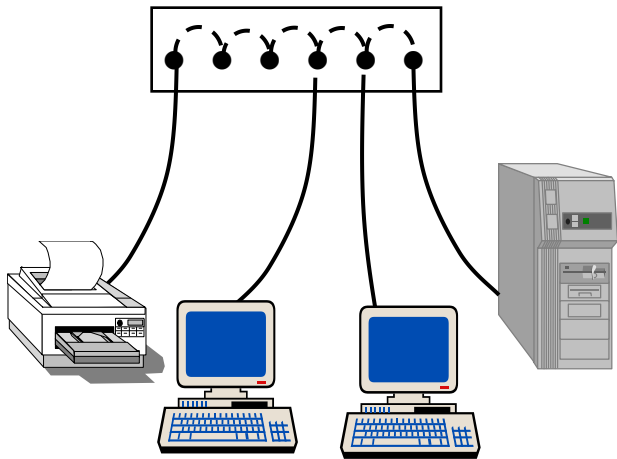
24-gauge 双绞线对的数据速率

Standard	Data Rate	Distance
T-1	1.544 Mbps	18,000 feet, 5.5 km
DS2	6.312 Mbps	12,000 feet, 3.7 km
1/4 STS-1	12.960 Mbps	4500 feet, 1.4 km
1/2 STS-1	25.920 Mbps	3000 feet, 0.9 km
STS-1	51.840 Mbps	1000 feet, 300 m





以太网 (Ethernet LANs)



- 3类线: 非屏蔽(UTP), 普通电话线
- 5类线: UTP, 更紧的绕线密度, 提高信号质量
- 屏蔽双绞线 (STP): 抗干扰, 贵
- 10BASE-T Ethernet
- 100BASE-T4 *Fast* Ethernet
- Cat5 & STP provide other options

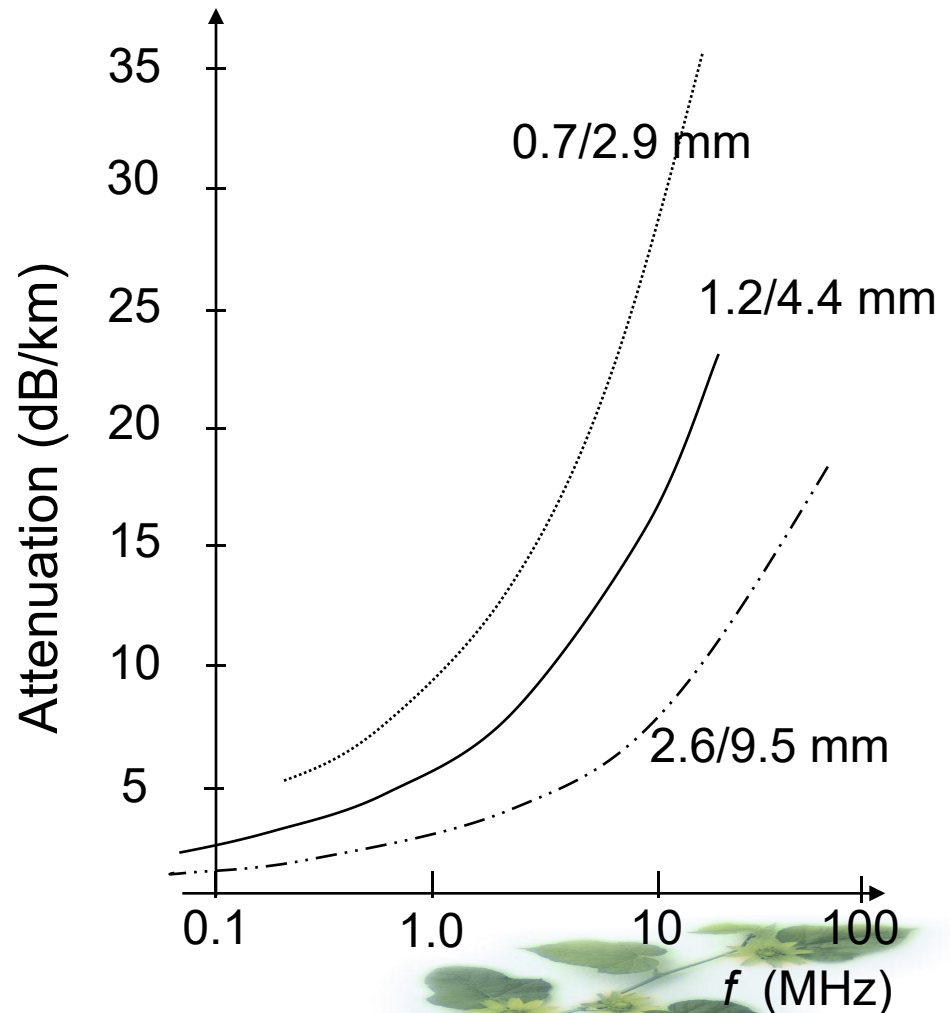




同轴电缆

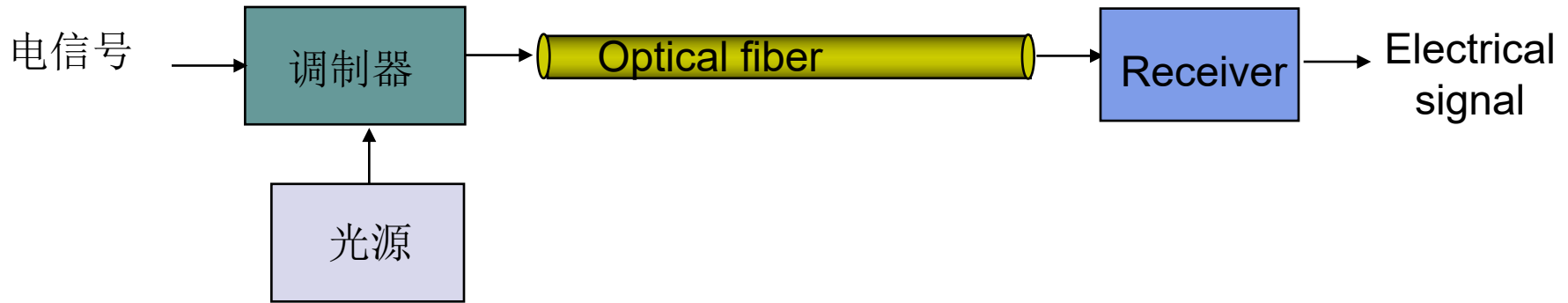


- 圆柱形编织外导体包围绝缘内导线
- 高抗干扰性
- 比双绞线带宽更高
- 几百MHz（双绞线最高几十MHz）





光纤



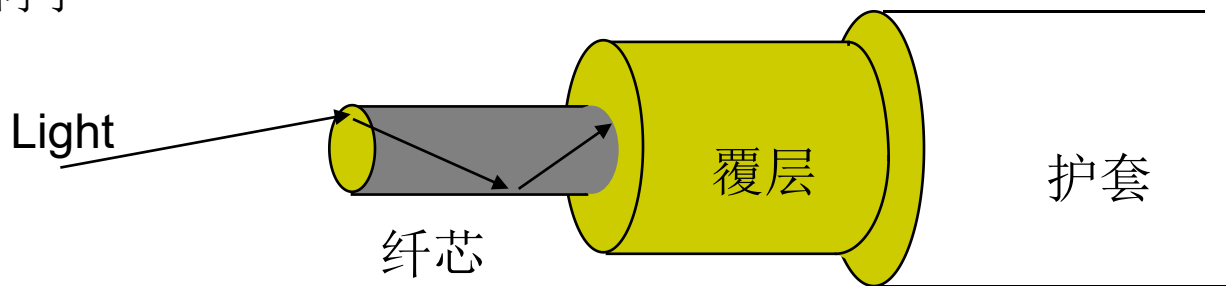
- 光源 (激光, LEDs) 生成光脉冲, 发送到光纤
 - 长距离 (>1000 km)
 - 高速度 (>40 Gbps/波长)
 - 几乎无差错 (BER of 10^{-15})
- 对网络体系结构影响深刻



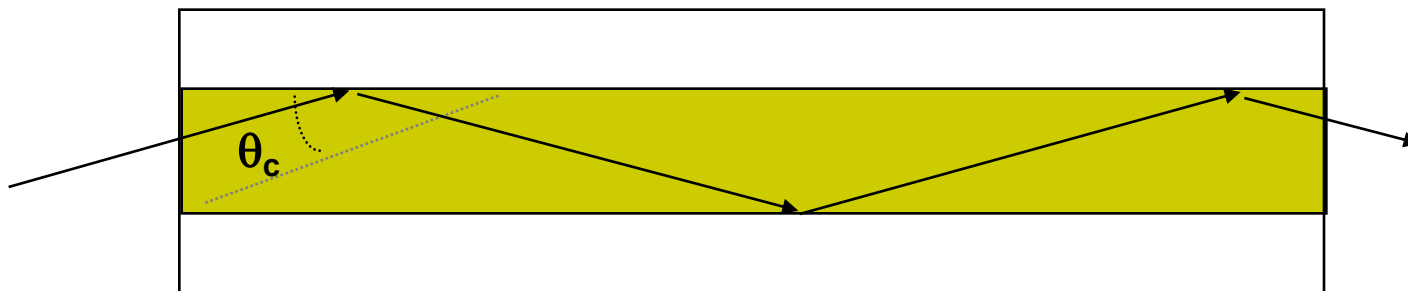


光纤传输

光纤几何学



光纤中的全反射



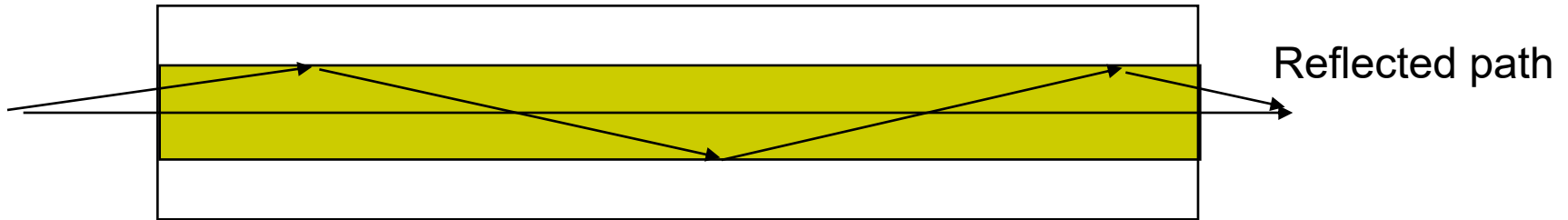
- 纤芯的折射率比覆层高
- 以小于临界角 θ_c 入射的光线被完全反射回纤芯



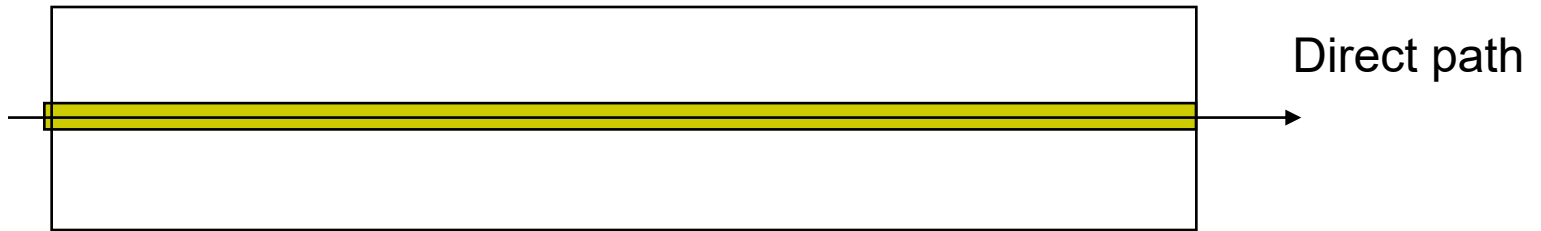


多模和单模光纤

多模光纤：多条光线的路径不同



单模光纤：只有一个直接路径在光纤中传播



- 多模：较厚的纤芯，不同路径上的光线相互干扰，导致色散和有限的比特率
- 单模：非常薄的纤芯，更昂贵的激光器，但实现非常高的速度





光纤的特性

优点：

- 低衰减
- 抗干扰
- 高带宽
- 安全性：很难在不破坏的情况下获取信息
- 耐腐蚀
- 比铜线更紧凑、更轻

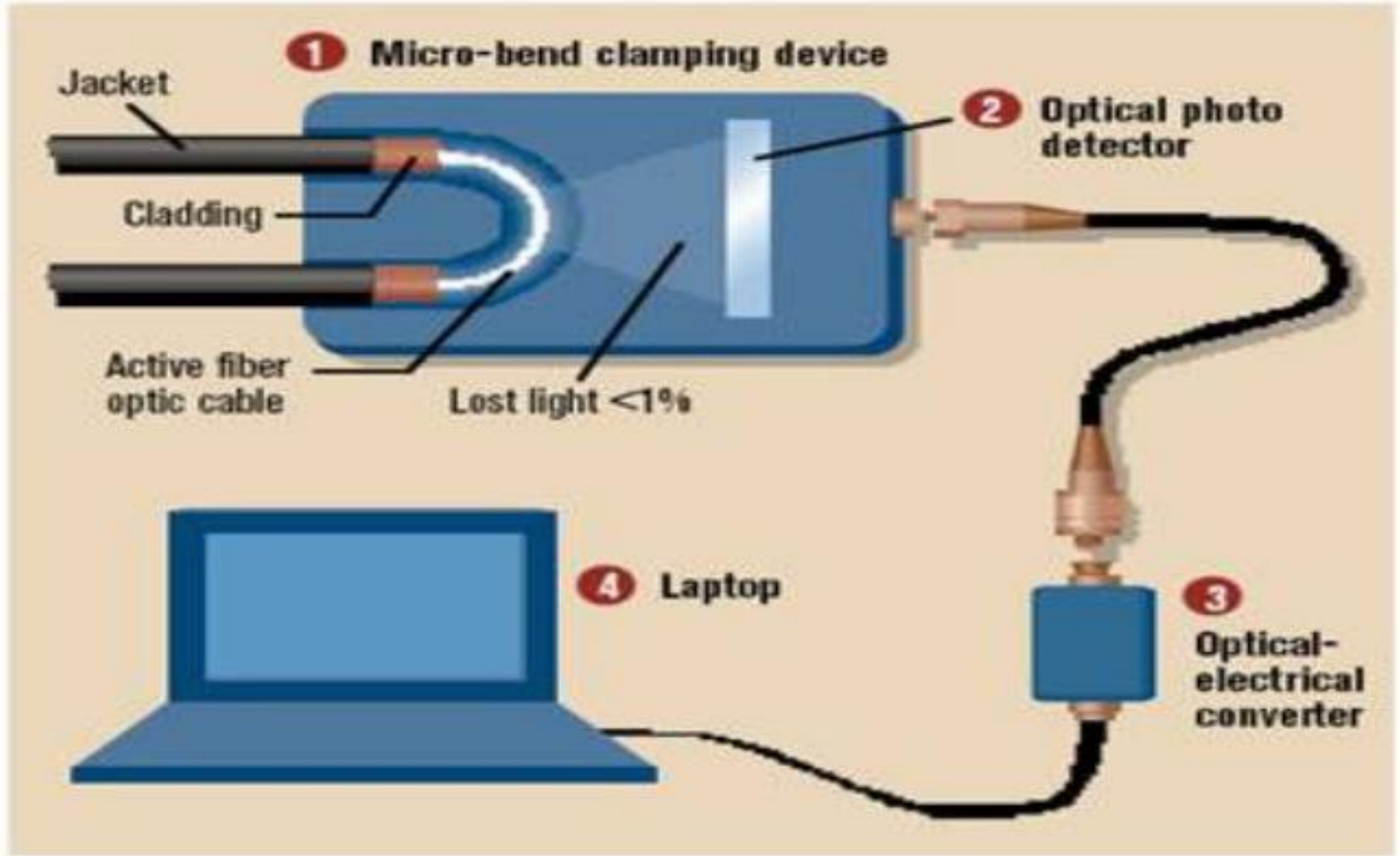
缺点：

- 新型光信号损伤和色散
- 有限弯曲半径
- 难以拼接



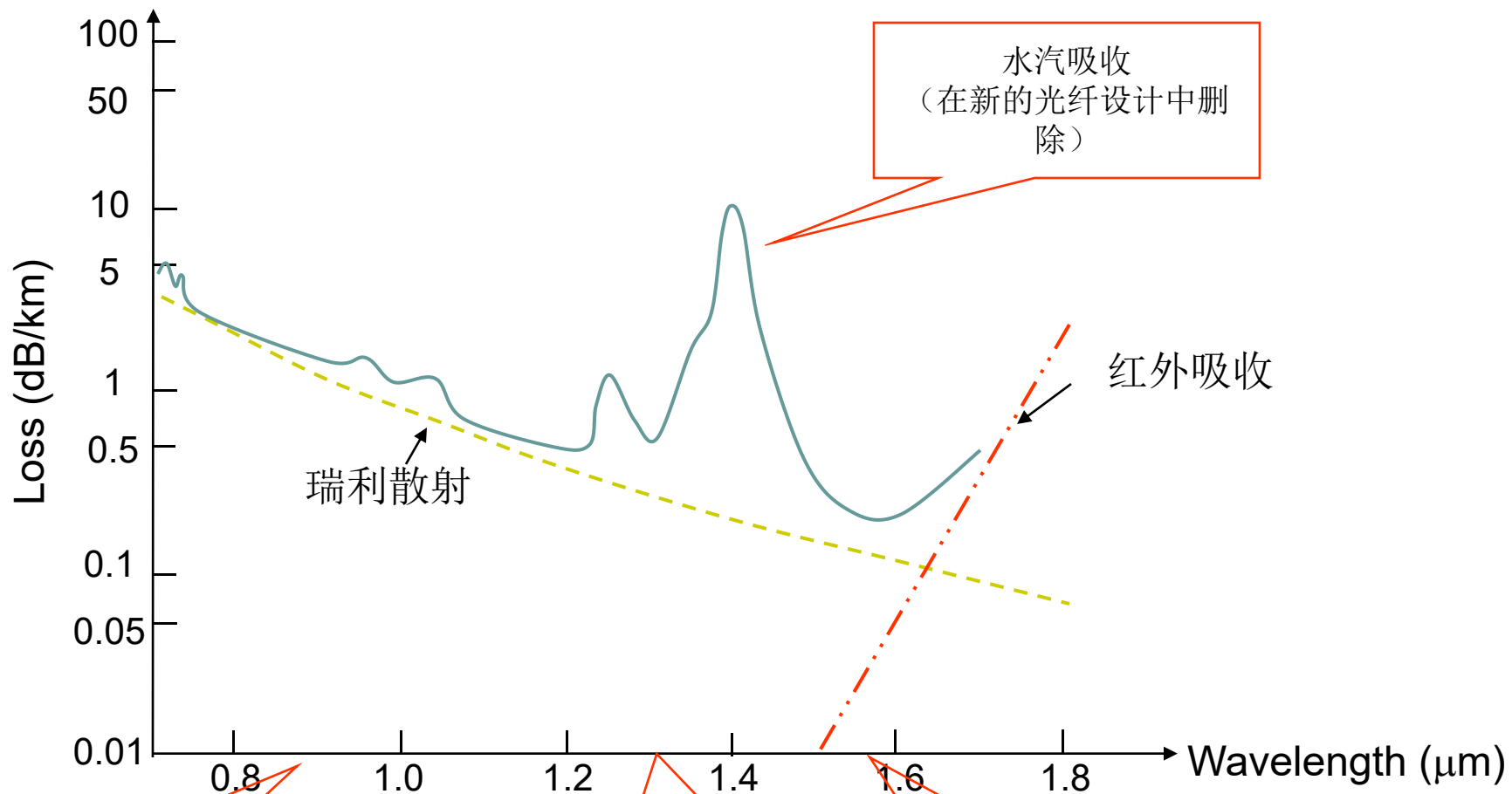


Security? NO!





低衰减



水汽吸收
(在新的光纤设计中删除)

红外吸收

瑞利散射

850 nm
Low-cost LEDs
LANs

1300 nm
城域网
“短途”

1550 nm
长途网络



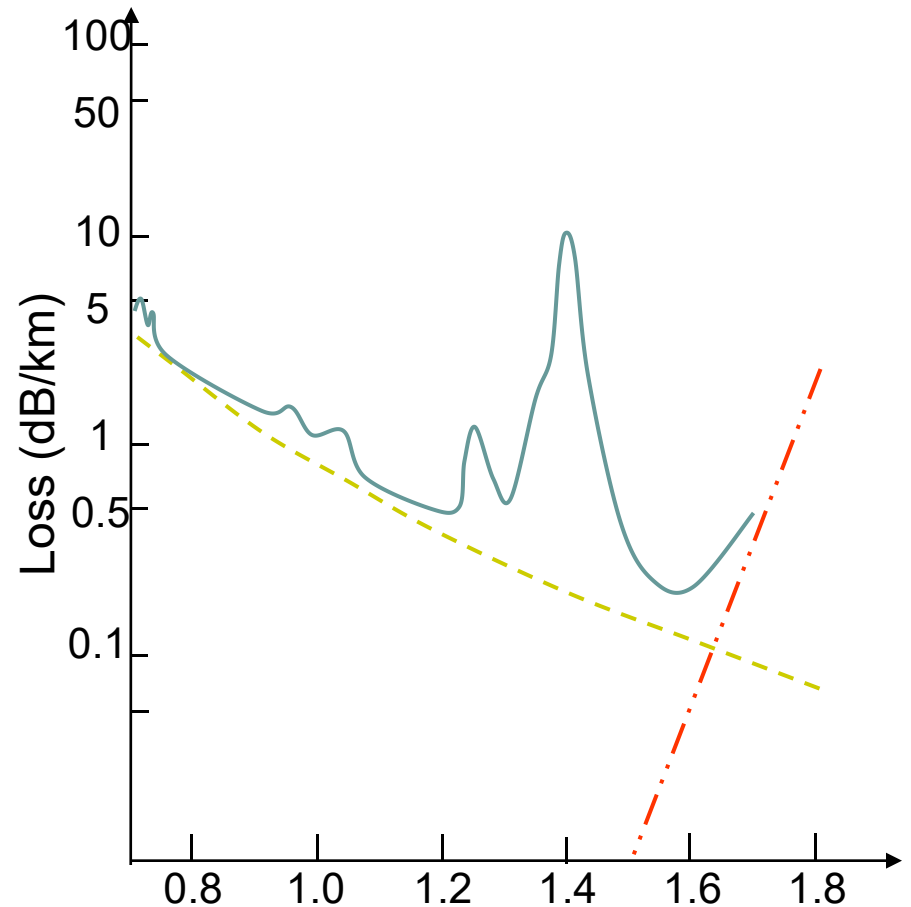
巨大的可用带宽

- 从 λ_1 到 $\lambda_1 + \Delta\lambda$ 包含的带宽

$$B = f_1 - f_2 = \frac{v}{\lambda_1} - \frac{v}{\lambda_1 + \Delta\lambda}$$
$$= \frac{v}{\lambda_1} \left\{ \frac{\Delta\lambda / \lambda_1}{1 + \Delta\lambda / \lambda_1} \right\} \approx \frac{v \Delta\lambda}{\lambda_1^2}$$

- 例如: $\lambda_1 = 1450 \text{ nm}$ λ_1
 $+ \Delta\lambda = 1650 \text{ nm}$:

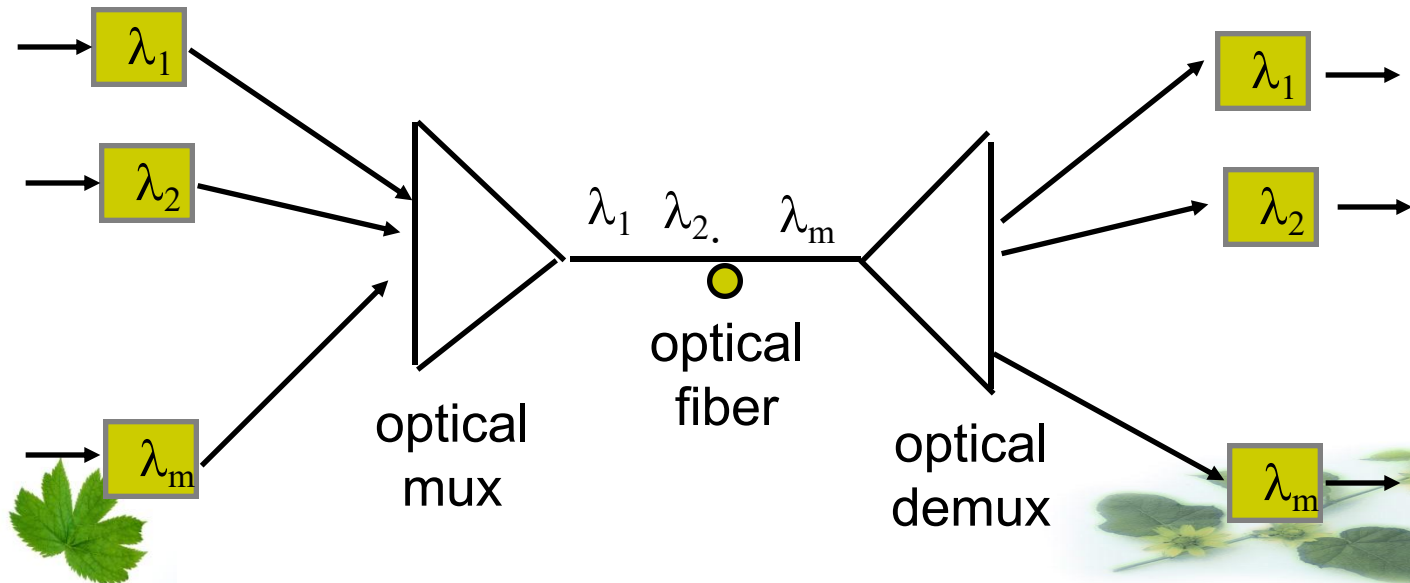
$$B = \frac{2(10^8) \text{ m/s } 200 \text{ nm}}{(1450 \text{ nm})^2} \approx 19 \text{ THz}$$





波分复用

- 不同的波长携带不同的信号
- 复用到共享光纤中
- 每个波长都像是一个单独的电路
- 如果一根光纤传输160个波长，每波长10 Gbps:1.6 Tbps!
- 目前，单根光纤带宽可达560Tbps





无线传输

- 无线电信号：天线发射在空气/空间中辐射的正弦信号（载波）
- 使用调制（如**QAM**）信息嵌入到载波信号中
- 无绳通信
 - 蜂窝电话, 卫星传输, 无线局域网
- 多径传播导致衰落
- 用户间干扰
- 频谱由国家和国际组织监管





例子

➤ 卫星通信

➤ 蜂窝电话

- 1G: 800, 900 MHz, 模拟语音
- 2G: 1800-1900 MHz, 数字语言, 短消息

➤ 无线局域网

- Unlicensed ISM spectrum: Industrial, Scientific, Medical.
902-928 MHz, 2.400-2.4835 GHz, 5.725-5.850 GHz
- IEEE 802.11 LAN standard: 11-54 Mbps

