



第 2 讲 物理层

刘志敏

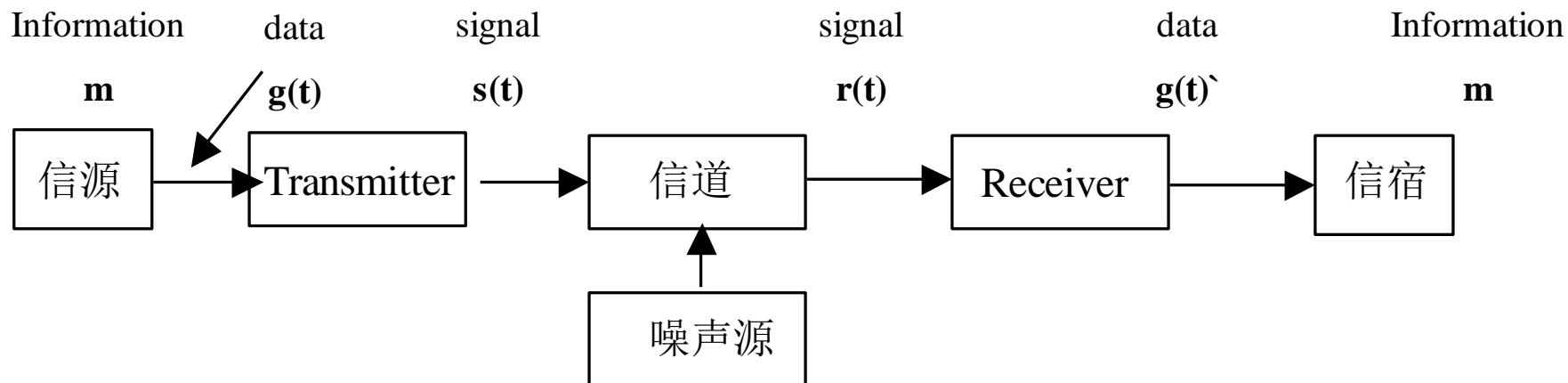
liuzm@pku.edu.cn



提纲

- 物理层：定义了为建立、维护和拆除物理链路所需的机械的、电气的、功能的和规程的特性，其作用是使比特流能在物理媒体上传输。提供的服务包括：
 - (1) 提供传送和接收比特流的能力，物理连接的建立、维持和释放问题。
 - (2) 在两个相邻系统之间唯一地标识数据电路。
- 数据传输理论：信道传输的限制
- 传输介质：常用传输介质的特性
- 数字调制技术：比特与信号间的转换技术及常见通信系统
- 信道复用：在一条传输介质上提供多个数据传输信道的方法

通信系统模型



通信系统的一般模型

数据(data)——携带信息（即比特）的实体

信号(signal)——信号是表示消息的物理量，随时间变化



通信系统的主要参数

- 信号功率S，单位为W(Watt)（焦耳/秒）或mW
- 信号带宽B：与收发设备及传输介质的特性有关，单位为Hz
- 噪声功率N：通信线路上的平均噪声功率
- SNR：S/N为**信噪比**，单位为分贝 dB，
$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(S/N)$$
- 数据率：数据传输速率， bps
 - 信息传输速率（或数据率）与哪些因素有关？
- 误码率：数据传输错误的概率，衡量数据传输的质量，单位为 1×10^{-n}

信号分析的方法——傅立叶分析

- 任何一个周期为T的函数g(t)，可以用傅立叶级数来表示

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

- 其中， $f=1/T$ 为基频， a_n, b_n 为n次谐波的sine和cosine幅度，c为常量

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \cos(2\pi nft) dt = \begin{cases} 0 & \text{for } k \neq n \\ \frac{T}{2} & \text{for } k = n \end{cases}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

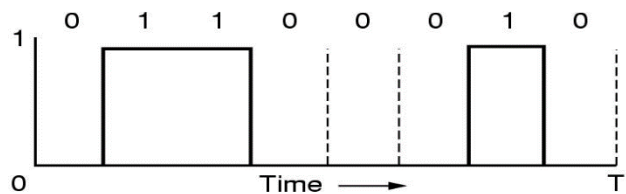
傅立叶分析

- 信号可被分解为频率为 $\omega=2\pi nf$ 的纯周期信号之和
- 信道——由电子器件构成的设备和传输介质，传输不同频率的信号其响应不同，即信道具有频率选择性！例如：
 - 字符 **b** 的ASCII为 $(01100010)_2$ 用脉冲信号传输
 - 采用傅立叶分析

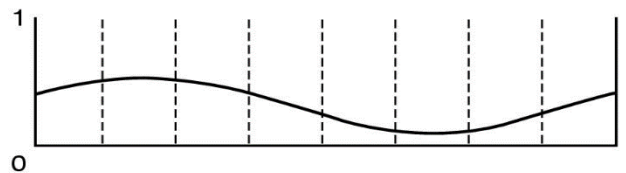
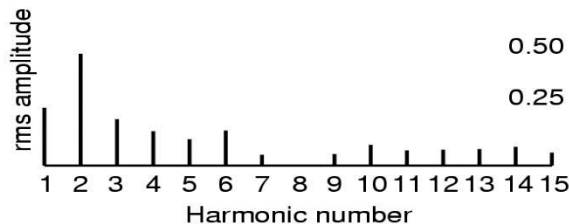
$$a_n = \frac{1}{\pi n} \left[\cos\left(\frac{1}{4}\pi n\right) - \cos\left(\frac{3}{4}\pi n\right) + \cos\left(\frac{6}{4}\pi n\right) - \cos\left(\frac{7}{4}\pi n\right) \right]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} \left[-\sin\left(\frac{1}{4}\pi n\right) + \sin\left(\frac{3}{4}\pi n\right) - \sin\left(\frac{6}{4}\pi n\right) + \sin\left(\frac{7}{4}\pi n\right) \right]$$

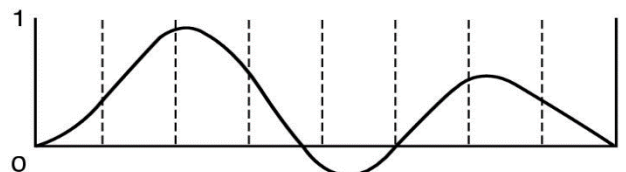
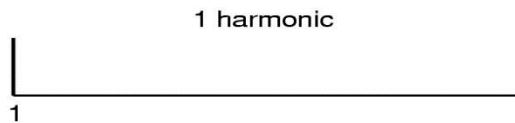
$$c = 3/4$$



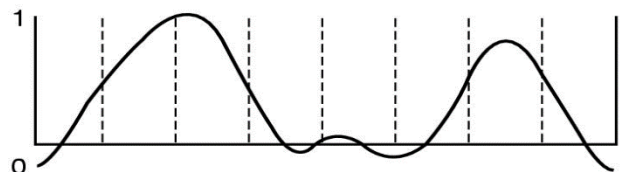
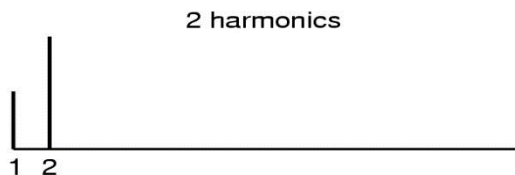
(a)



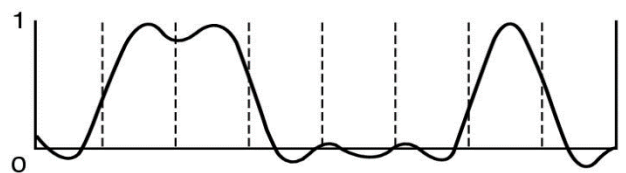
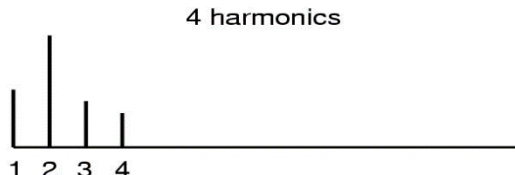
(b)



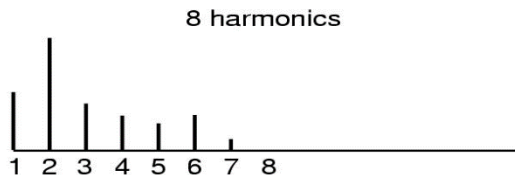
(c)



(d)



(e)



设速率为: **a bps**

则一个字符的周期

$T=8/a$ s , 频率为

$f=1/T=a/8$ Hz

设话音信道的截止频率

为**3000 Hz**

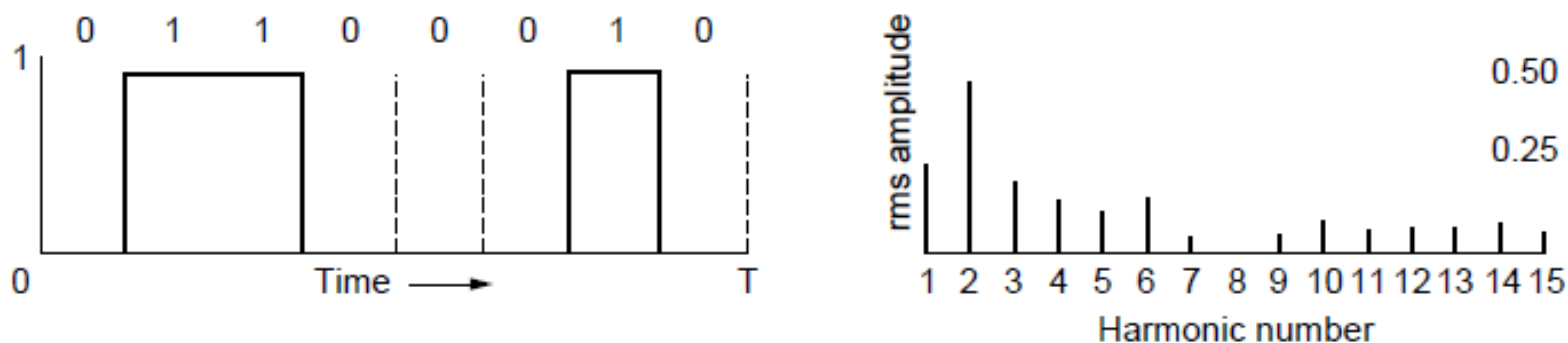
即能通过的最高次谐波

$nf=3000$

$n=3000/f=24000/a$

信号带宽受限

- 各频率分量的幅度 $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$
- 表示信号传输的能量



(a)

二进制信号及其傅立叶变换的各次谐波分量的幅度

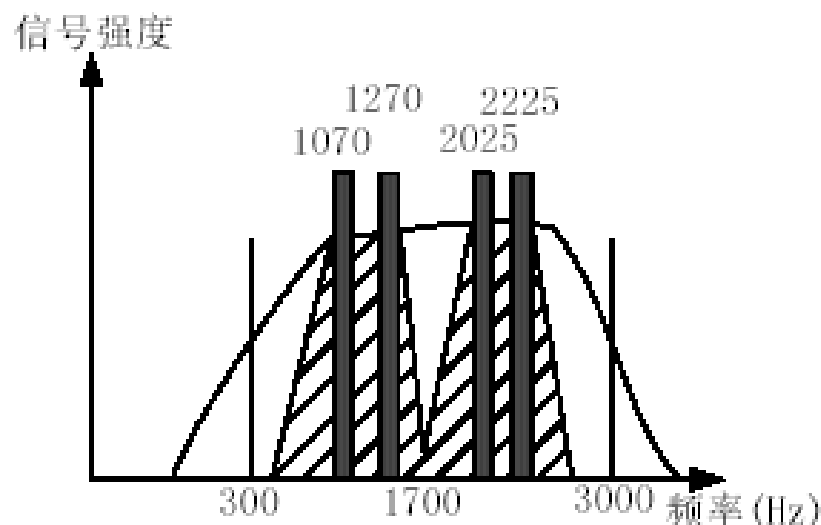
话音信道上数据率与通过的谐波数

a (bps)	T(ms)	1次谐波 f_1	通过的谐波数
300	26.67	37.5	80
600	13.33	75.0	40
1200	6.67	150.0	20
2400	3.33	300.0	10
4800	1.67	600.0	5
9600	0.83	1200.0	2
19200	0.42	2400.0	1
38400	0.21	4800.0	0

信道带宽(3000Hz)确定时, 数据率不同, 则通过的谐波数即信号能量不同。**传输带宽影响数据率!**
而传输带宽与通信设备、传输介质有关

信号带宽受限

- 信号经过传输将损失能量
- 若所有成份的衰减量相同，则信号不会失真
- 然而，各种通信设备和传输介质对不同频率信号的衰减是不同的，例如：
 - 有线电视，当频率超过某一频率衰减幅度急剧增加
 - 通信设备中的滤波器限制信号带宽
- 传输带宽：是传输中幅度衰减不明显的频率范围；定义为接收功率由最大降为1/2（3dB）的频率范围



信道最大数据率

- 奈奎斯特定理：在理想无噪声的信道条件下最大数据率 $= 2B\log_2 V$ ，其中 B 为信道带宽， V 为信号中的状态数
 - 因信道带宽为 B ，则最大采样率为 $2B$ 时可以重构信号，而信号中 V 个状态可以表示 $\log_2 V$ 个比特
- 香农(Shannon)容量公式：信道极限信息传输速率或无误差容量 C 遵从公式
$$C = B \log_2(1+S/N) \text{ b/s}$$
 - S 信号功率、 N 为噪声功率
 - 信噪比 $\text{SNR}=S/N$
 - $\text{SNR}_{\text{dB}}=10\log_{10}\text{SNR}$
- 如何提高数据率？增加信号带宽，提高信噪比



应用举例

- 某个信道频谱在3MHz-4MHz，信噪比为30dB，则带宽为1MHz，最大数据速率为

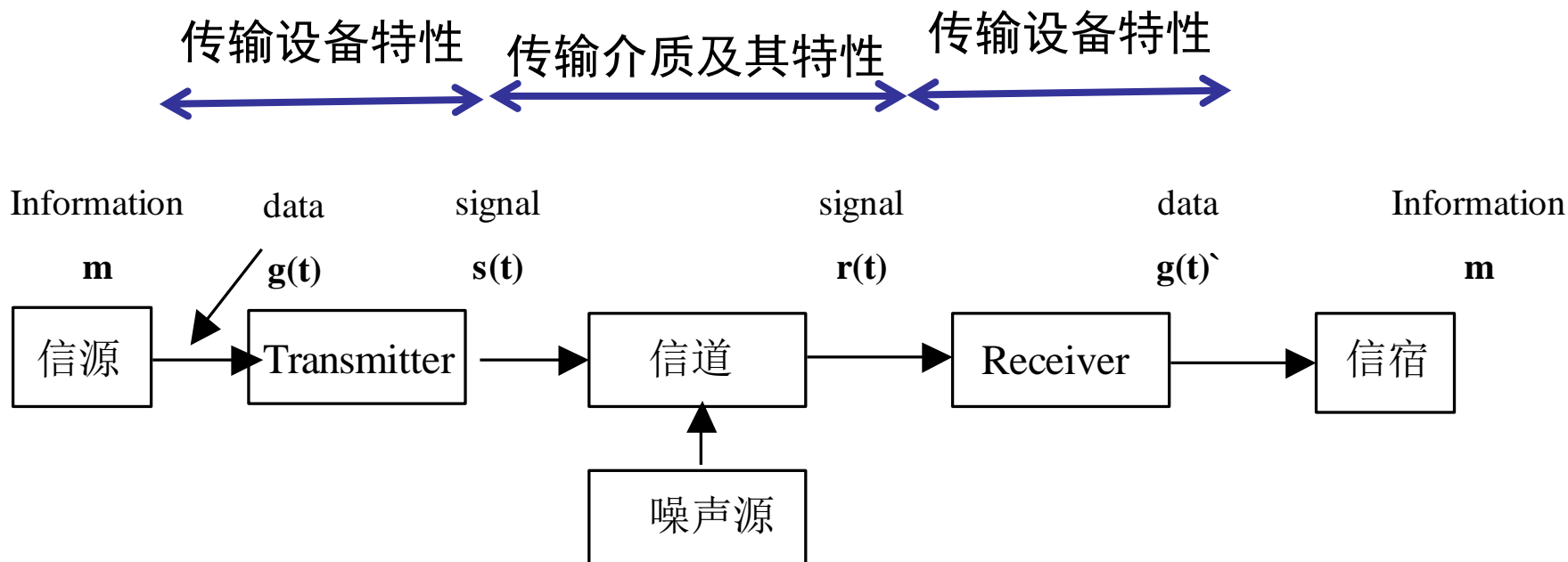
$$\begin{aligned}C &= 1000000 \times \log_2 \left(1 + 10^{\frac{30}{10}} \right) \\&= 1000000 \times \log_2 1001 \\&= 10\text{M}(b/s)\end{aligned}$$



提纲

- 物理层：定义了为建立、维护和拆除物理链路所需的机械的、电气的、功能的和规程的特性，其作用是使比特流能在物理媒体上传输。提供的服务包括：
 - (1) 提供传送和接收比特流的能力，物理连接的建立、维持和释放问题。
 - (2) 在两个相邻系统之间唯一地标识数据电路。
- 数据传输理论：信道传输的限制
- 传输介质：常用传输介质的特性
- 数字调制技术：比特与信号间的转换技术及常见通信系统
- 信道复用：在一条传输介质上提供多个数据传输信道的方法

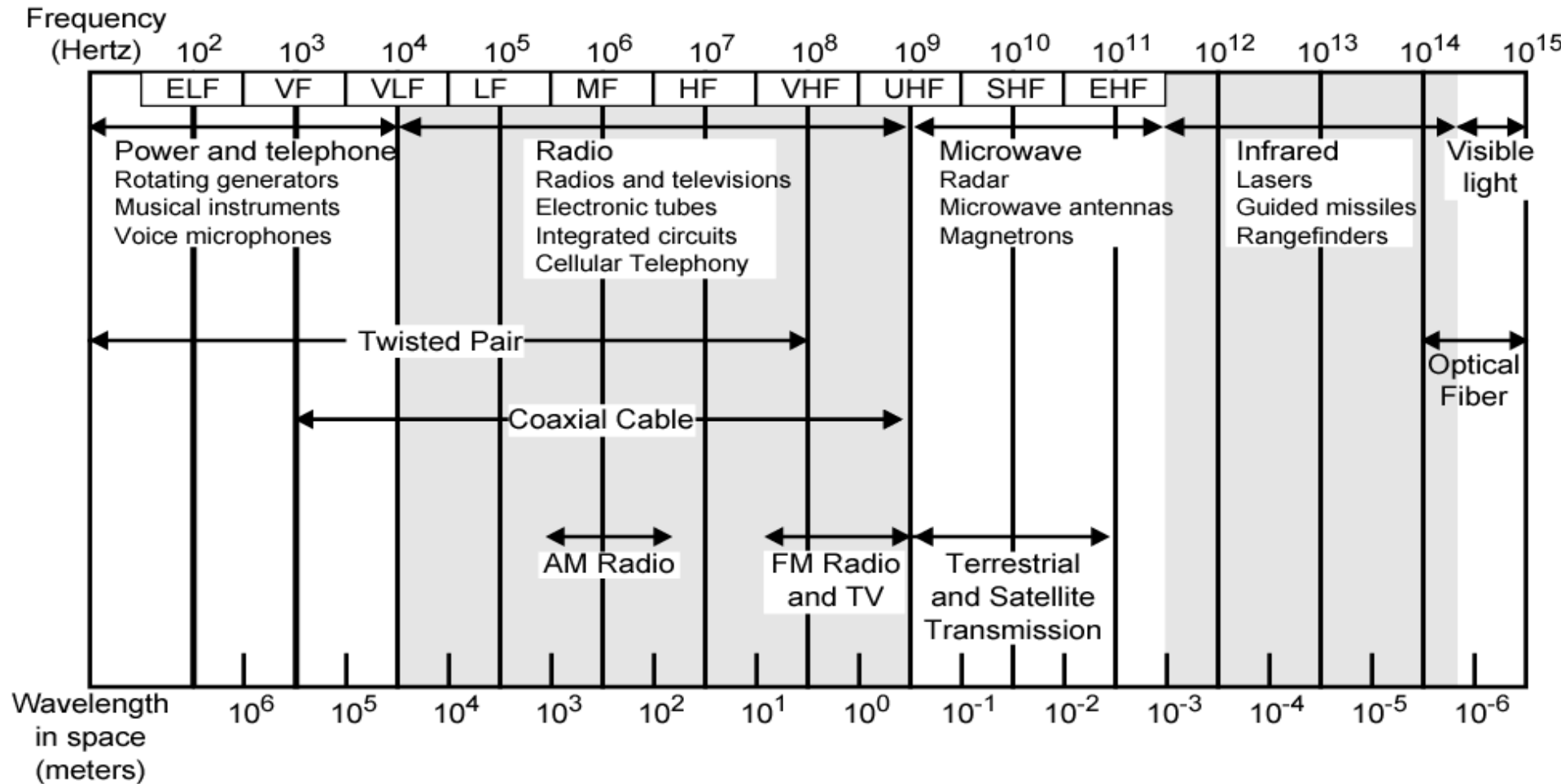
通信系统模型



数据 (data) —— 携带信息的实体。

信号 (signal) —— 数据的电磁表示。

数据通信的频率范围



ELF = Extremely low frequency

VF = Voice frequency

VLF = Very low frequency

LF = Low frequency

MF = Medium frequency

HF = High frequency

VHF = Very high frequency

UHF = Ultrahigh frequency

SHF = Superhigh frequency

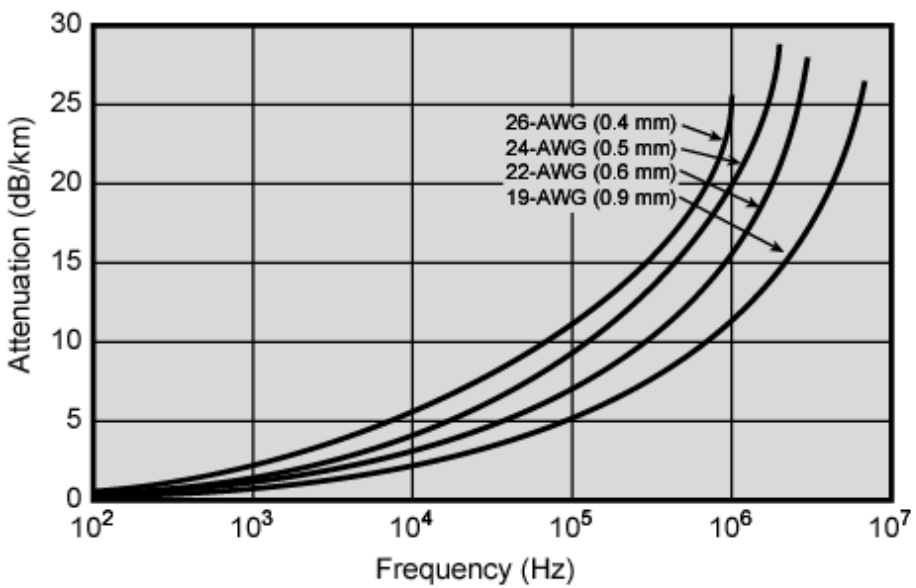
EHF = Extremely high frequency



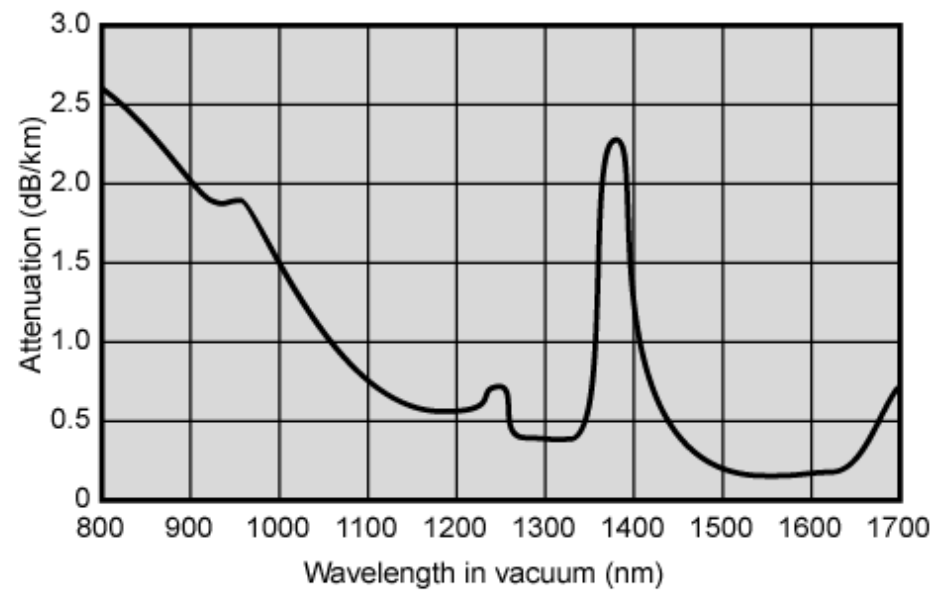
有线传输

■ 双绞线、同轴电缆、光缆的传输特性

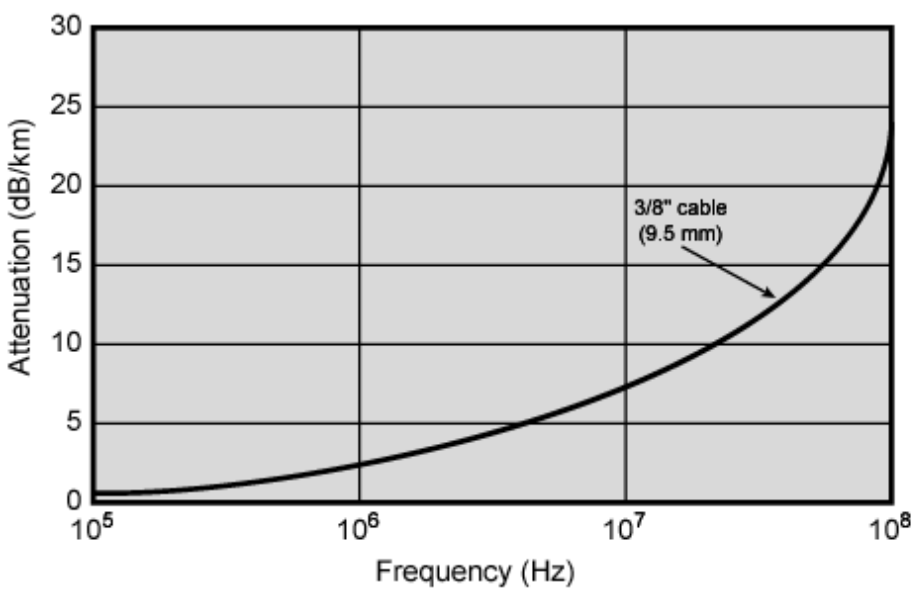
	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 μ s/km	2 km
Twisted pairs (multi-pair cables)	0 to 1 MHz	0.7 dB/km @ 1 kHz	5 μ s/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 μ s/km	1 to 9 km
Optical fiber	186 to 370 THz	0.2 to 0.5 dB/km	5 μ s/km	40 km



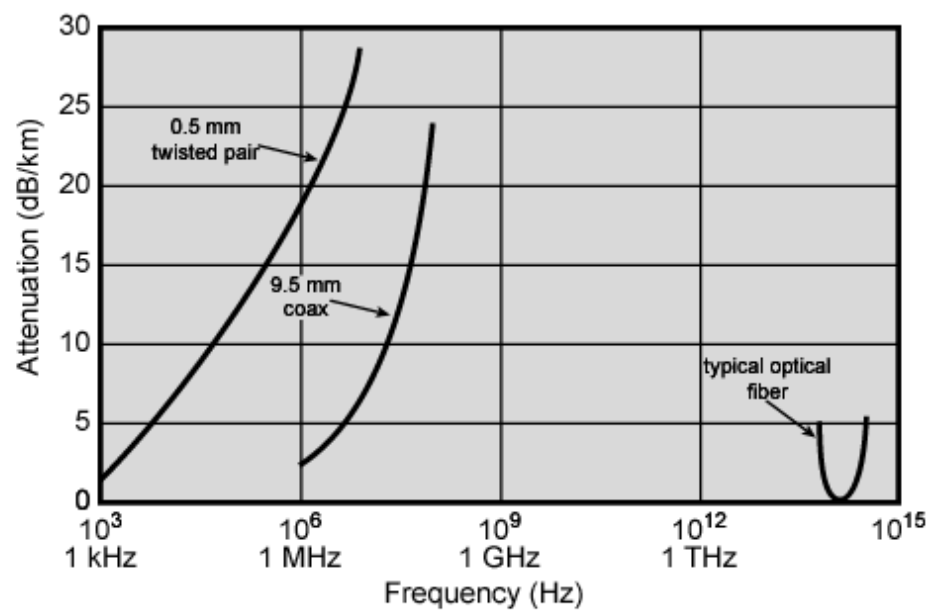
(a) Twisted pair (based on [REEV95])



(c) Optical fiber (based on [FREE02])



(b) Coaxial cable (based on [BELL90])



(d) Composite graph

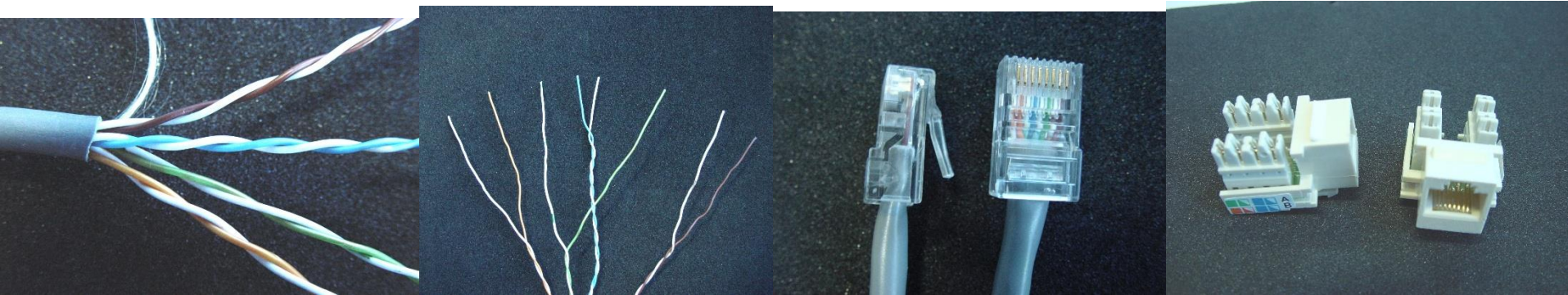
双绞线 TP(Twisted Pair)

- 由两条相互绝缘的铜线组成，直径约为1mm，两条象螺纹一样绞在一起。
 - Shielded Twisted Pair(STP) 屏蔽双绞线
 - Unshielded Twisted Pair(UTP)无屏蔽双绞线
- 双绞线的传输距离一般为100m，既可传输模拟信号，也可传输数字信号。

- Separately insulated
- Twisted together
- Often "bundled" into cables
- Usually installed in building during construction



(a) Twisted pair



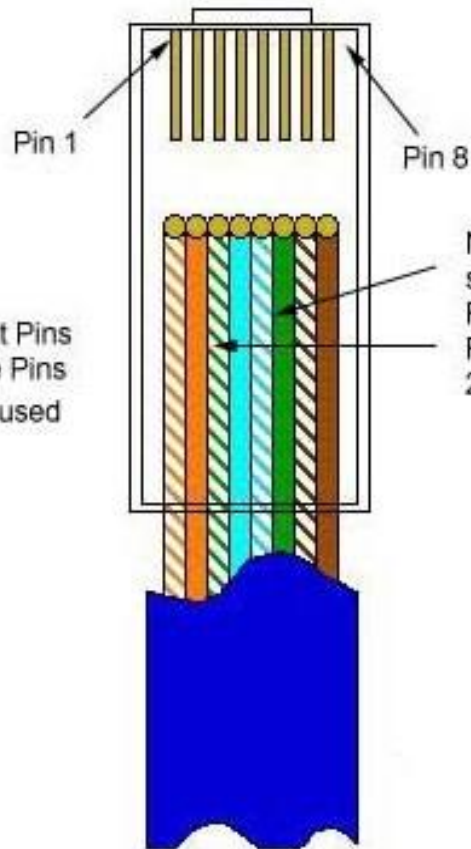


无屏蔽双绞线

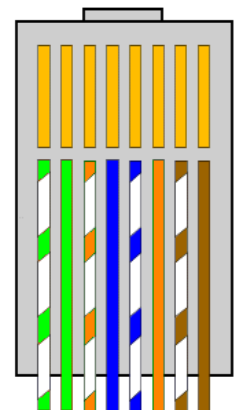
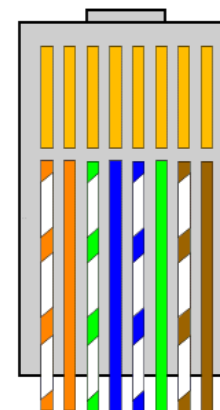
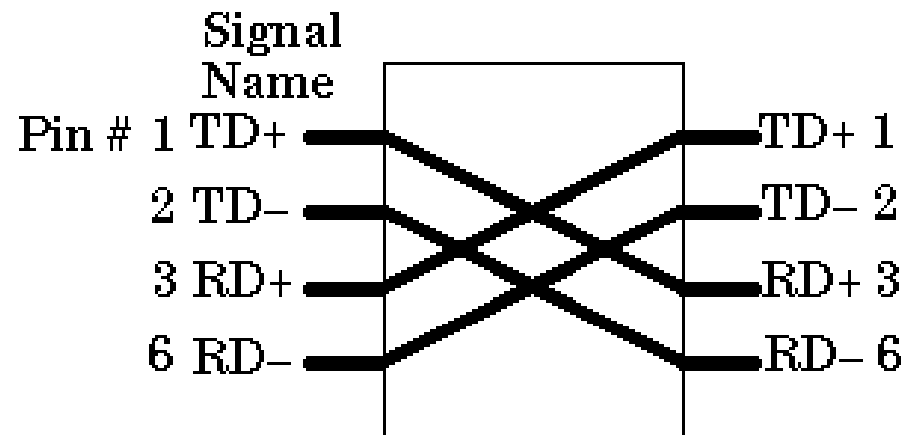
The EIA/TIA (Electronic Industry Association/Telecommunication Industry Association) has established standards of UTP.

■ Type	Use
■ Category 1	Voice Only (Telephone Wire)
■ Category 2	Data to 4 Mbps (Local Talk)
■ Category 3	Data to 10 Mbps (Ethernet)
■ Category 4	Data to 20 Mbps (16 Mbps Token Ring)
■ Category 5	Data to 100 Mbps (Fast Ethernet)
■ Category 5e	Data to 100 Mbps (Fast Ethernet)
■ Category 6	Data to 250 MHz (Gigabit Ethernet?)
■ Category 7	Data to 600 MHz

Pins 1 & 2 are the Transmit Pins
 Pins 3 & 6 are the Receive Pins
 Pins 4, 5, 7, and 8 are not used

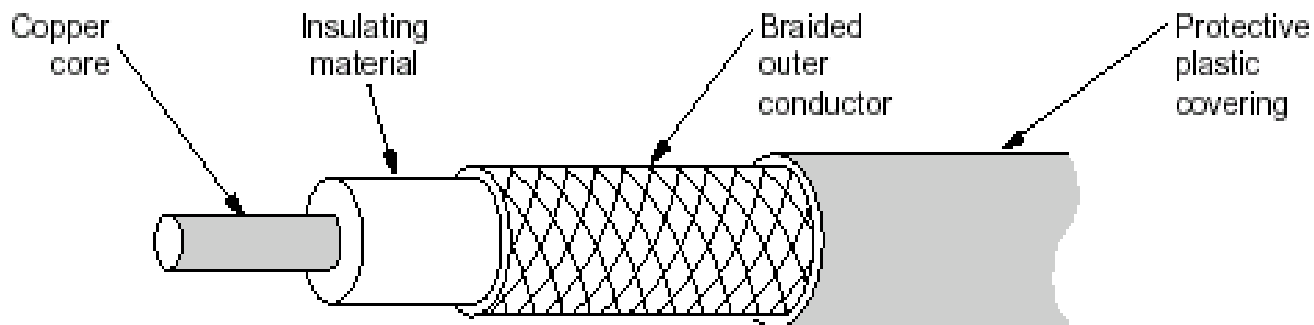


Notice that the Green pair has to be separated before crimping on the RJ45 plug. If this is not done, the Receive Data will be split between 2 pairs and performance will degrade!



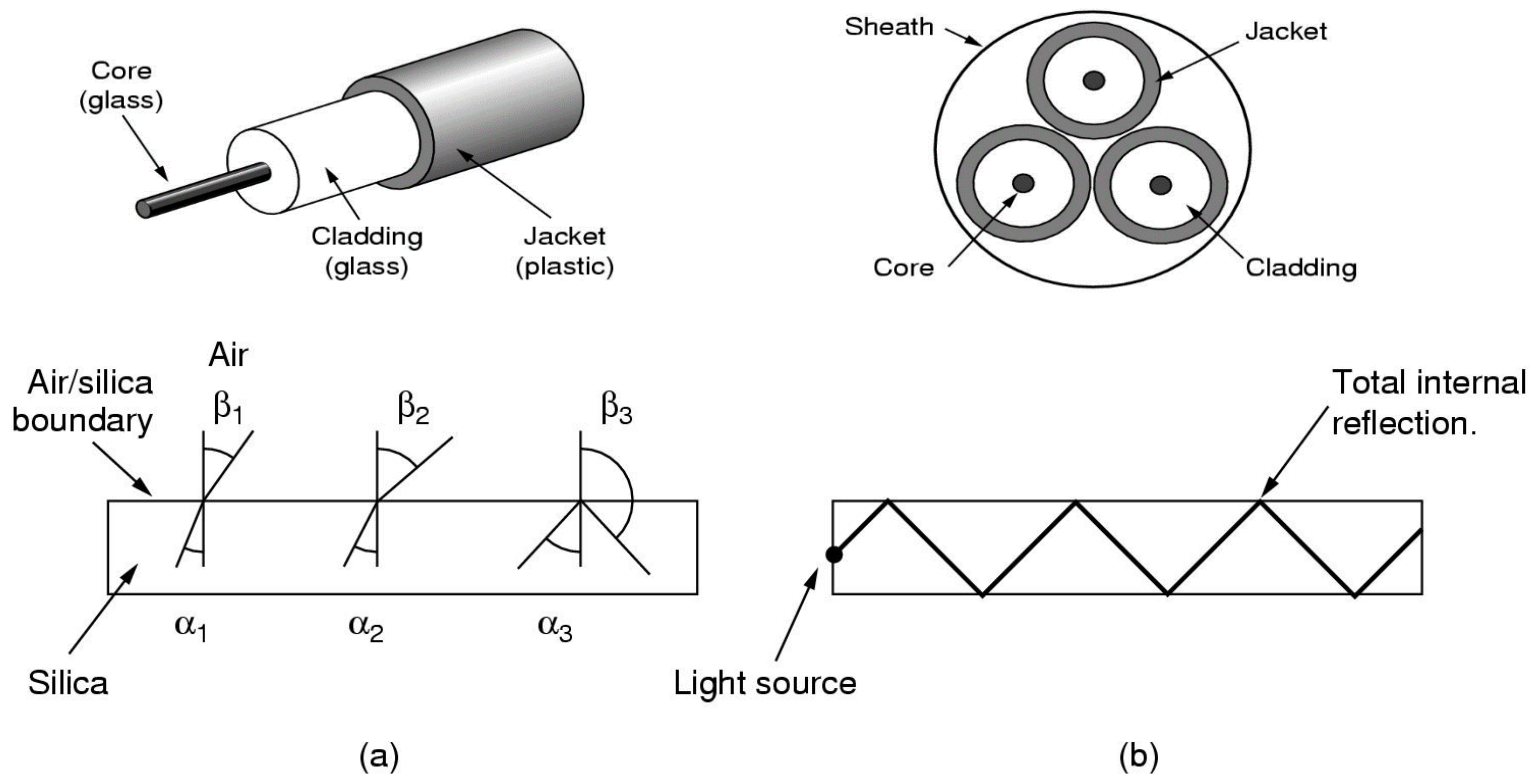
同轴电缆

- 基带同轴电缆（Baseband Coax）：匹配阻抗为 50Ω ，用于数字信号传输，分为：
 - 粗缆（Thick）：10Base-5，单段长度 ≤ 500 米，最长5段达2.5公里
 - 细缆（Thin）：10Base-2，单段长度 ≤ 185 米，最长5段达925米。
- 宽带同轴电缆（Broadband Coax）：匹配阻抗为 75Ω ，用于电视信号的传输。



光纤

- 光纤由传导光波的高纯石英玻璃纤维和保护层（jacket）构成，其纤芯（core）的折射率大于其包层（cladding）折射率，这样光信号被保持在纤芯中不会散播出去。
- 经常将多根光纤封装在坚固的外壳（sheath）中，形成所谓的多芯光缆。





光纤

- 光发射系统：光源、传输介质、检测器
- 光源：LED（发光二极管）和ILD（注入型激光二极管），以光信号的有和无表示“1”和“0”。
- 检测器：接收端由光电二极管构成的光检测器将光信号转换成电信号。
- 光纤的连接
 - 机械式：快速，一般不需特殊设备，新技术和连接器改善了接合的损耗（有些 < 0.1 dB），适合于小数量和应急的应用。
 - 熔结：需要昂贵的特殊设备，极低的损耗（有的可达 < 0.05 dB），长距离链路的唯一方法。

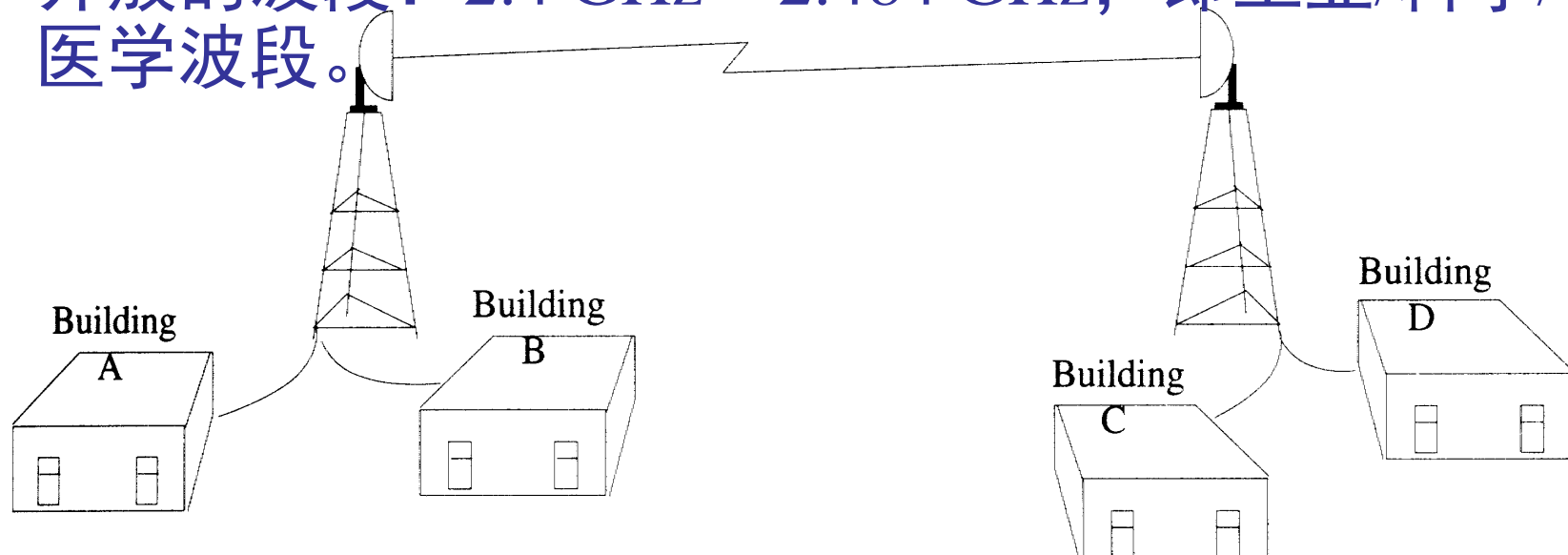


无线传输

- 2GHz 到 40GHz
 - 微波
 - 方向性强
 - 点到点
 - 卫星
- 30MHz 到 1GHz
 - 全向性
 - 无线电广播
- 3×10^{11} 到 2×10^{14}
 - 红外
 - 本地

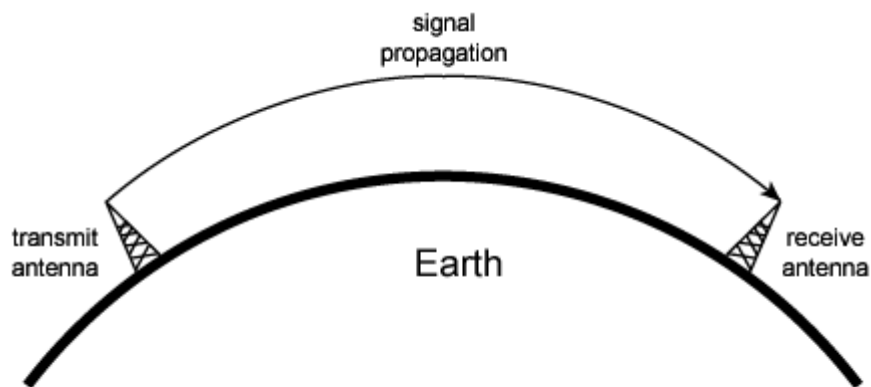
微波

- 频率100MHz以上的微波通过抛物面天线把能量集中于一窄束，具有更高的信噪比，沿直线实现视距传输。
- 在地面因地表弯曲，需中继站接续微波信号，100米高的塔可接续约80公里。
- 天气和频率的影响可形成多径导致信号减弱。
- 开放的波段：2.4 GHz ~ 2.484 GHz，即工业/科学/医学波段。



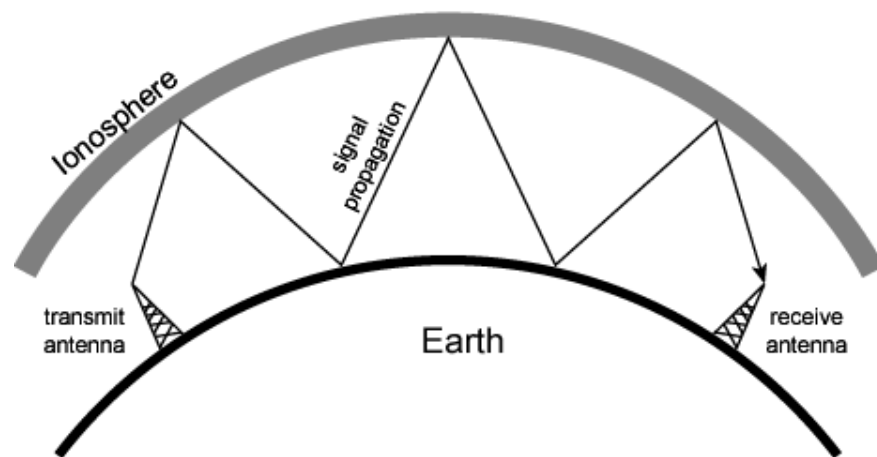
地面微波

■ 地波传播(2MHz以下)



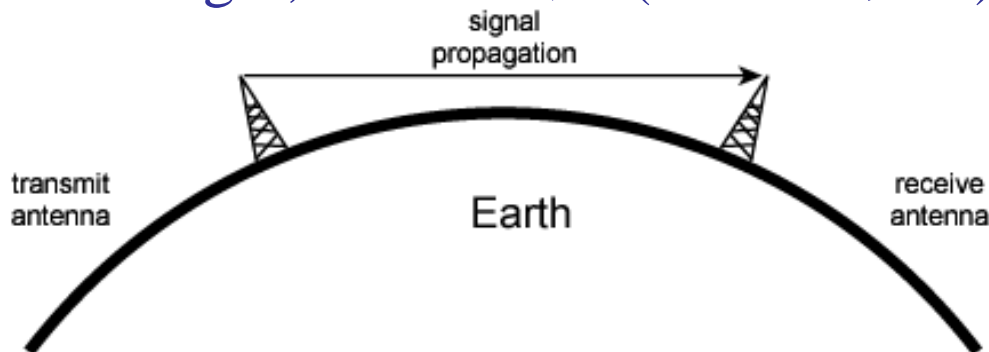
(a) Ground-wave propagation (below 2 MHz)

■ 天波传播(2~30MHz)



(b) Sky-wave propagation (2 to 30 MHz)

■ 视距 (Line-of-sight, LOS) 传播(30MHz以上)



(c) Line-of-sight (LOS) propagation (above 30 MHz)

无线传输中的天线

- 天线：实现电磁能量的辐射及接收，分为全向天线或定向天线

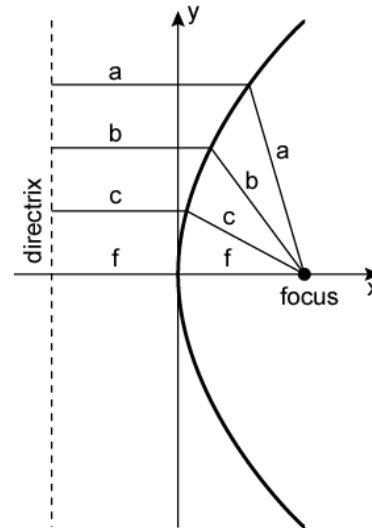
- 全向天线

- 距发射端d处的接收功率流密度 $\phi_r = P_t / (4\pi d^2)$

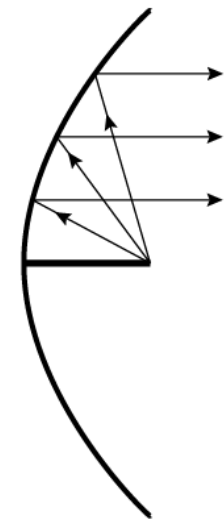
- 若接收天线的有效面积为a，

则 $P_r = \phi_r a = a P_t / (4\pi d^2)$ ，其中，有效面积 $a = \lambda^2 / (4\pi)$

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t$$



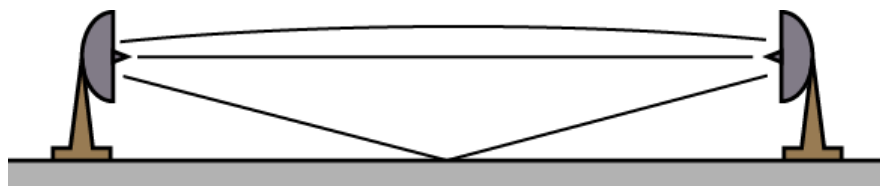
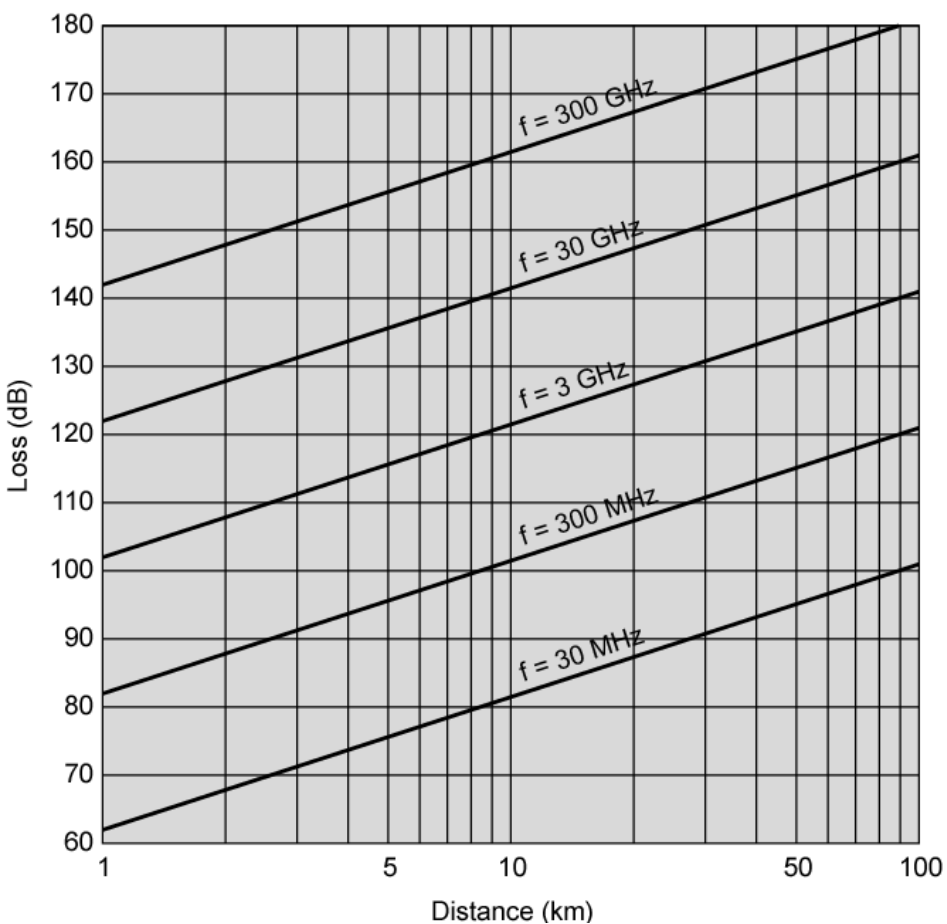
(a) Parabola



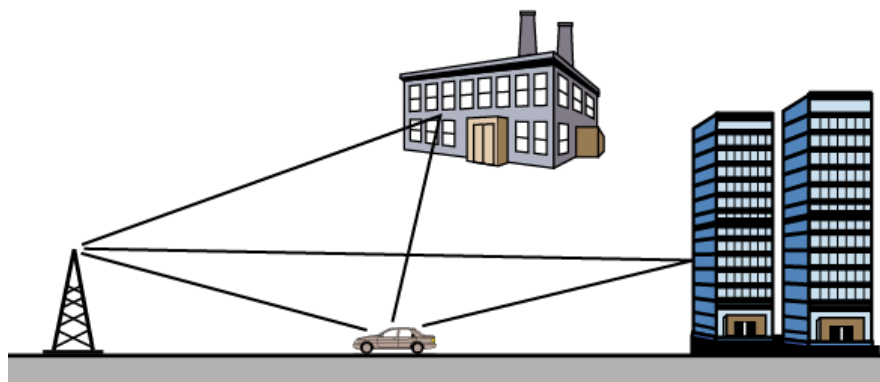
(b) Cross-section of parabolic antenna showing reflective property

自由空间的传播

路径损耗 $\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}$ 视距通信与多径干扰



(a) Microwave line of sight



(b) Mobile radio

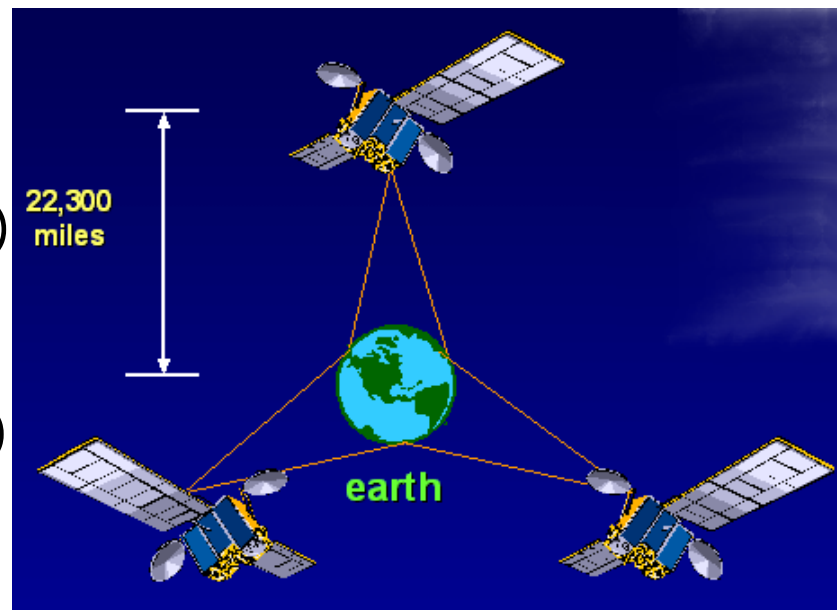
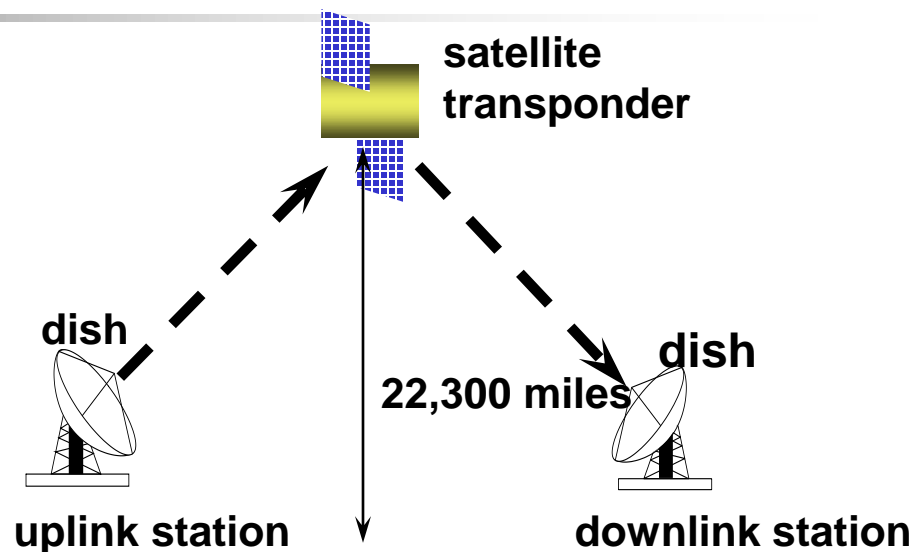
卫星微波通信

■ 地球同步卫星

- 赤道上方约36000km处
- 卫星作为空间微波中继站
- 端-端传输时延250~300ms
- 广播信道

■ 主要卫星波段

- C band: 4(下行3.7~4.2 GHz) - 6(uplink 5.925~6.425GHz), 问题: 拥挤串扰
- Ku band: 11(下行11.7~12.2 GHz) - 14(上行14.0~14.5 GHz), 问题: 雨衰 (降雨导致信号衰减严重)
- Ka band: 20(下行17.7~21.7 GHz) - 30(上行27.5~30.5GHz), 问题: 雨衰, 设备造价



低轨移动卫星

- 数十颗卫星组网，卫星高度750km，采用圆形极地轨道，上下行链路运行在L波段（1.6GHz）。
- 用途：定位，通信

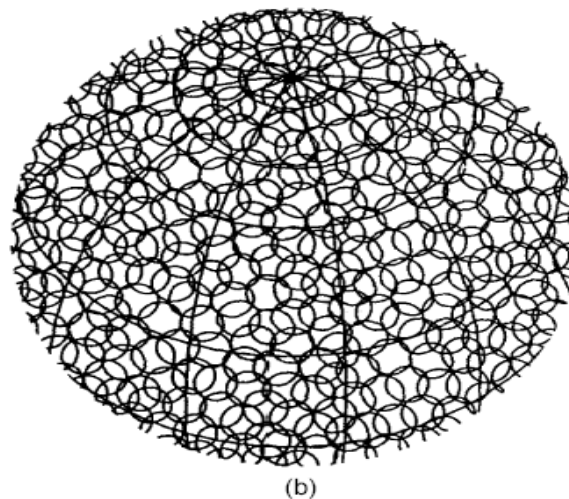
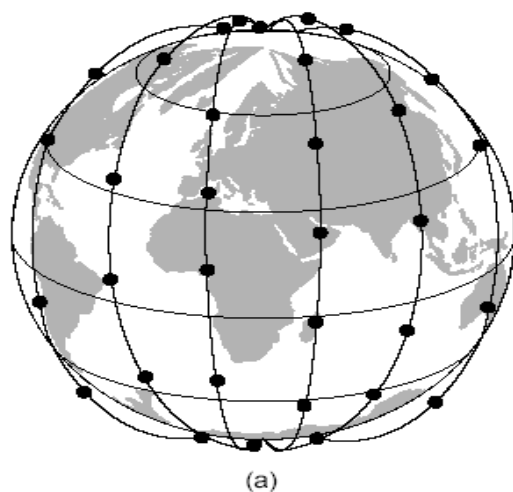


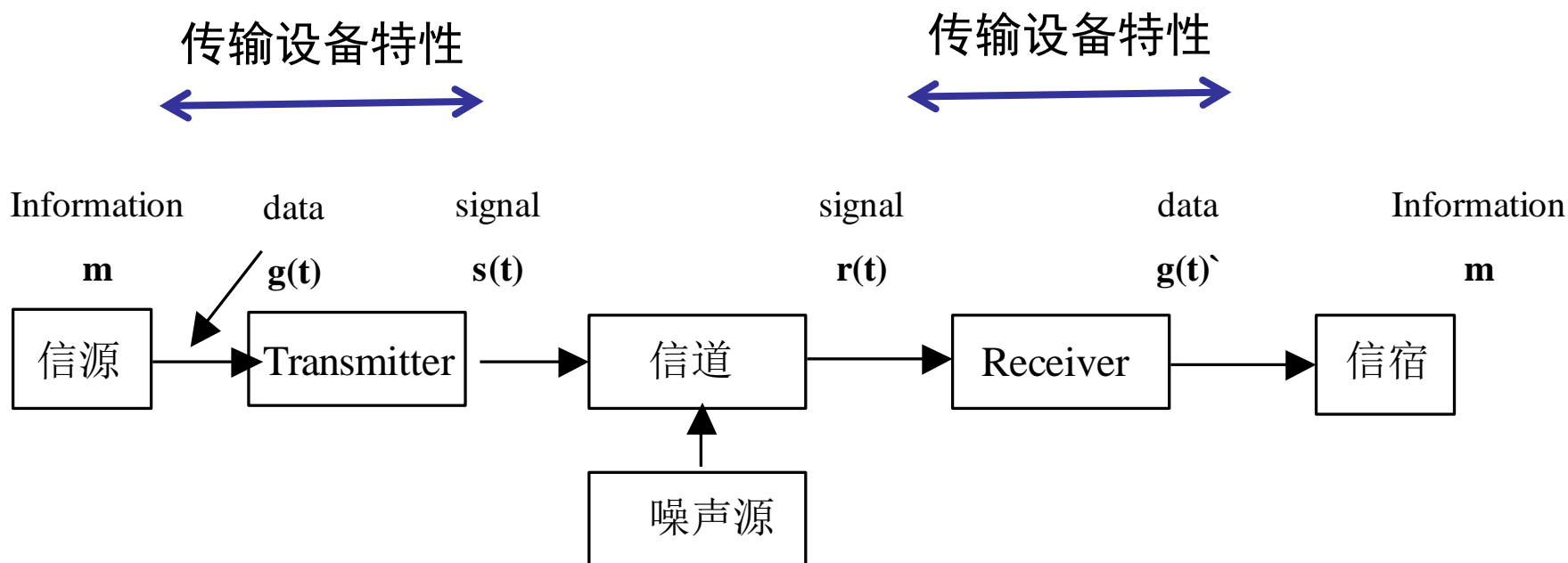
Fig. 2-57. (a) The Iridium satellites form six necklaces around the earth. (b) 1628 moving cells cover the earth.



提纲

- 物理层：定义了为建立、维护和拆除物理链路所需的机械的、电气的、功能的和规程的特性，其作用是使比特流能在物理媒体上传输。提供的服务包括：
 - (1) 提供传送和接收比特流的能力，物理连接的建立、维持和释放问题。
 - (2) 在两个相邻系统之间唯一地标识数据电路。
- 数据传输理论：信道传输的限制
- 传输介质：常用传输介质的特性
- 数字调制技术：比特与信号间的转换技术
- 信道复用：在一条传输介质上提供多个数据传输信道的方法

通信系统模型



数据 (data) —— 携带信息的实体。

信号 (signal) —— 数据的电磁表示。



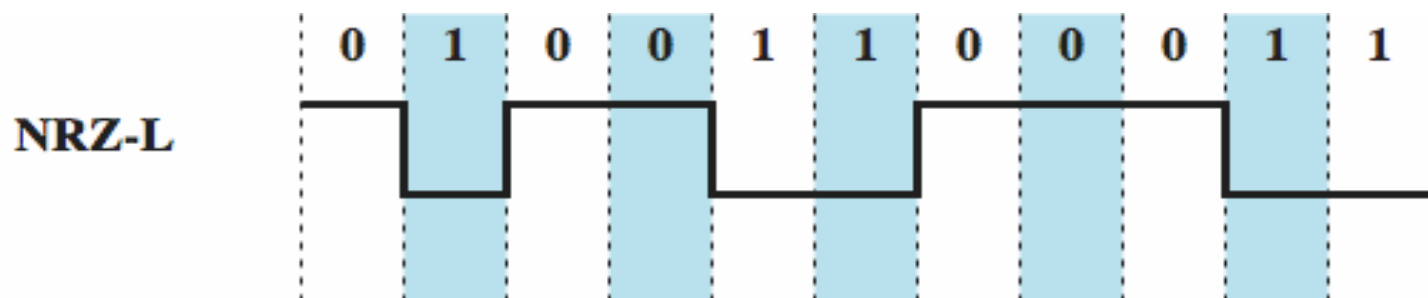
基带传输

- 将数据变换为数字信号，常用的编码
 - 不归零码NRZ(Non-Return-Zero)
 - 不归零反转码NRZI(NRZ Inverted)
 - 曼彻斯特编码 (Manchester Encoding)
 - 差分曼彻斯特编码
 - 4B5B编码

基带传输

■ NRZ (Non-Return-Zero) 编码

- 0表示为信号的高电平，1表示为信号的低电平



- 时钟恢复：根据跳变来恢复时钟，可能长时间发送连0（或1）致使信号电平无跳变，导致收发之间难以同步
- 信号平衡（或基线漂移）：用接收信号的均值来确定信号电平的高低，连1或连0会改变信号均值。

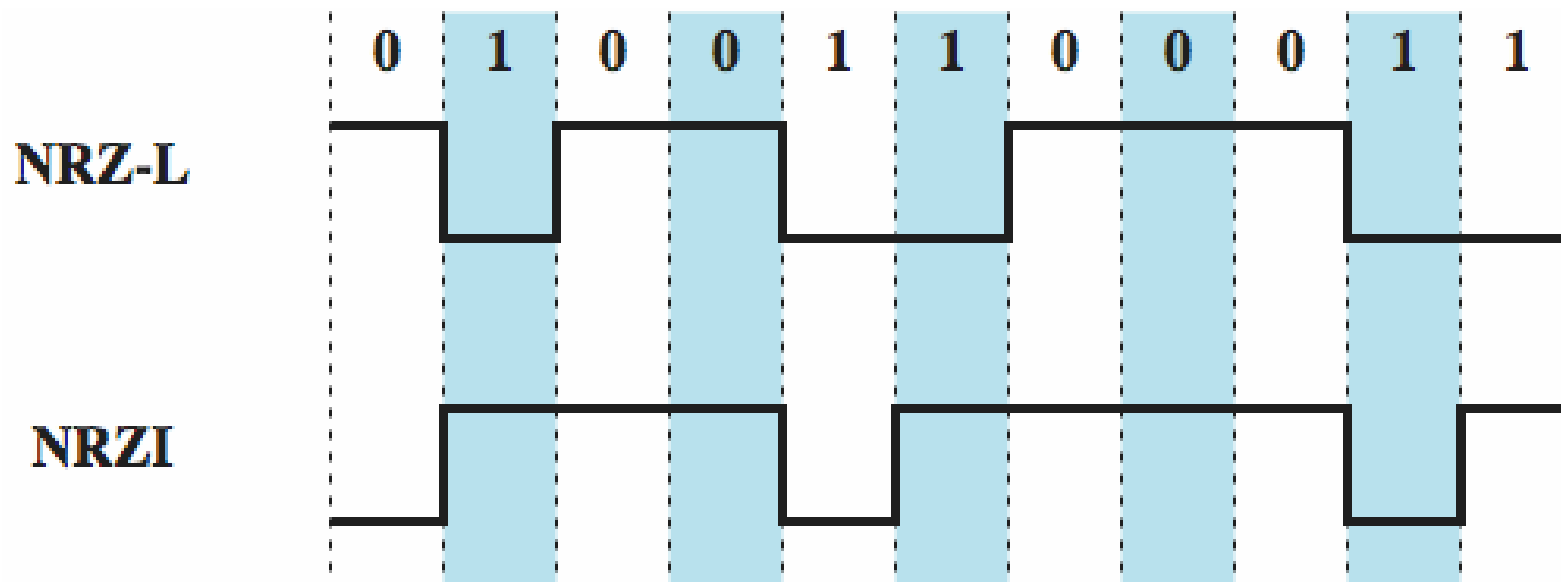


基带传输

- 带宽效率：与一个符号承载的比特数有关
 - 符号电平数多，则承载的比特也多，如8电平的符号可以表示3比特
 - 符号率：信号改变的速率，单位为波特率；若带宽为 B ，则符号率 $2B$ （根据奈奎斯特定理）
- 对于NRZ，若带宽为 B ，则数据率为 $2B$ 。

基带传输

- NRZI (NRZ Inverted) 编码：是一种差分编码
 - 用信号的跳变来表示1，无跳变表示0
 - 解决了连1问题，但连0问题依然存在
 - 带宽效率：若带宽为B，则数据率为2B

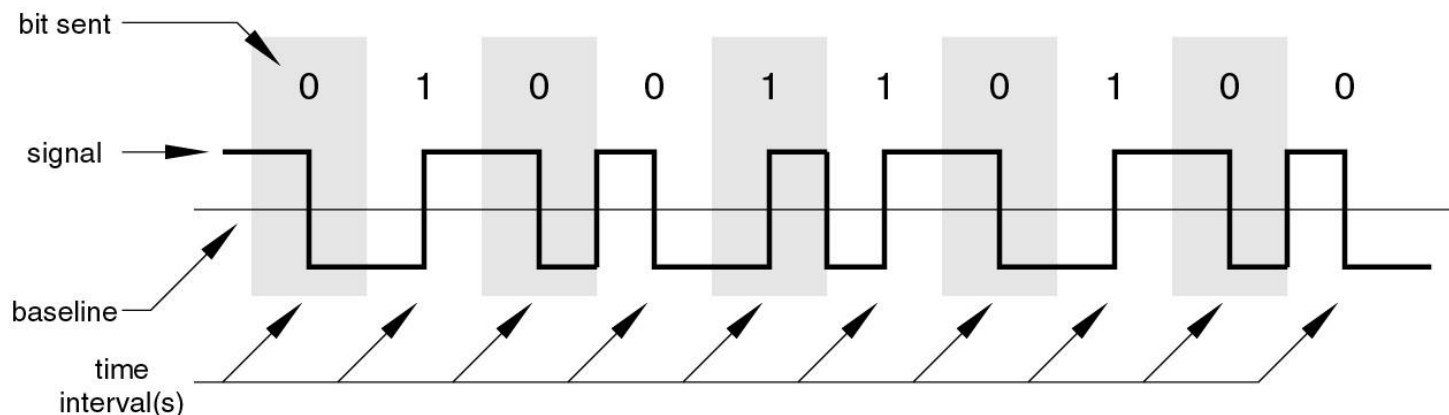


基带传输

■ 曼彻斯特编码

- 发送0时，电平由高到低跳变；发送1时，电平由低到高跳变。
- 在每比特时间内肯定有一次电平跳变，接收方通过检测该跳变来保持与发送方的位同步。
- 带宽效率：若带宽为 B ，则数据率为 B

Manchester Encoding

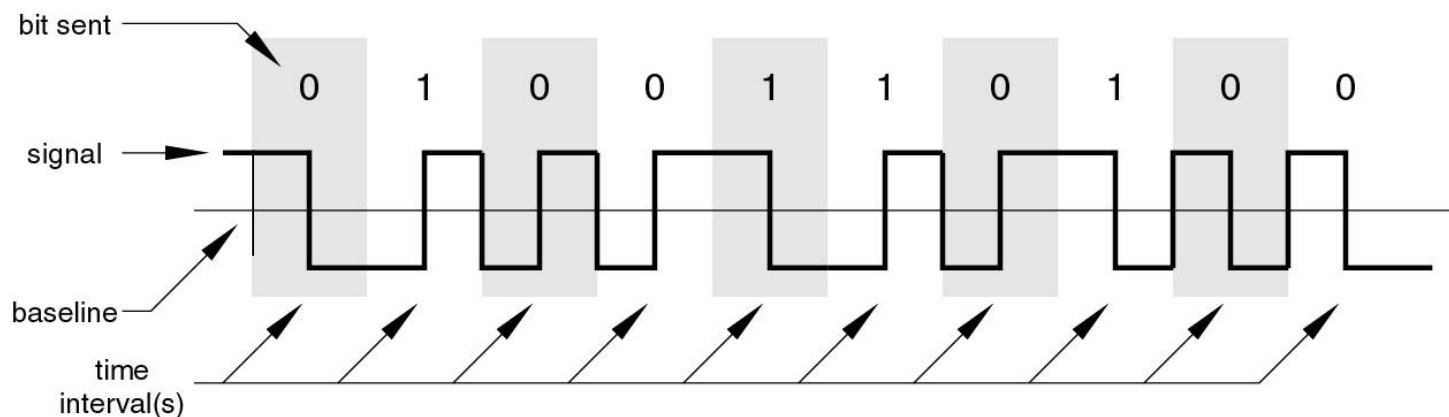


基带传输

■ 差分曼彻斯特编码

- 在每位信号的起始处，没有跳变表示1，有跳变表示0
- 在每比特时间内仍然有一个跳变，用来同步
- 需要更复杂的设备，有更好的抗干扰性

Differential Manchester Encoding

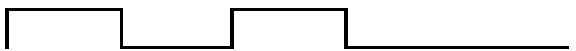
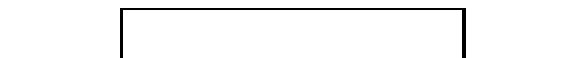

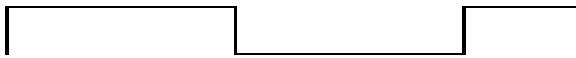
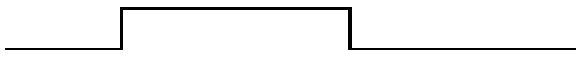
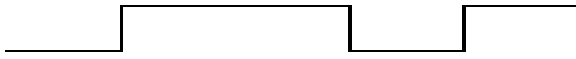
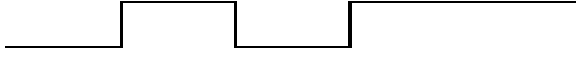
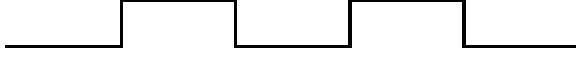




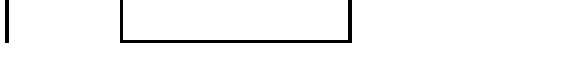
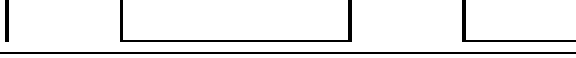
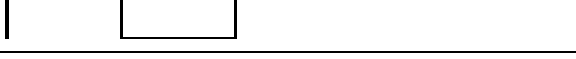





基带传输

■ 4B5B编码

- 4比特数据用5比特码组来编码，保证码组前部最多1个“0”，尾部最多2个“0”：即码组流连“0”不超过3个。
 - 保证码组中有更多的1
- 对码组再用NRZI编码，每5比特码组至少有2个“1”，即有2次跳变。
- 4B/5B的编码效率是80%。
- 用于100Mb/s以太网和光纤分布式数据接口FDDI。

数据	4 比特输入	5 比特输入	NRZI 的波形
0	0000	11110	
1	0001	01001	
2	0010	10100	
3	0011	10101	
4	0100	01010	
5	0101	01011	
6	0110	01110	
7	0111	01111	
8	1000	10010	
9	1001	10011	
A	1010	10110	
B	1011	10111	
C	1100	11010	
D	1101	11011	
E	1110	11100	
F	1111	11101	



通带传输

- 由于基带（baseband）信号在信道上长距离传输会受到衰减、畸变及噪音的影响，低频信号不适于远距离传输
- 各传输介质有其适于的信号频率范围
- 需要将数字信号转换成一种适合于在信道上传输的信号，这个转换过程就叫调制（modulation）。从信号中提取数字信号的相反过程称为解调（demodulation）。
- 调制解调器（MODEM）就是调制器（MOfulator）和解调器（DEModulator）的组合。



数字调制技术

- 正弦信号用 $A\sin(2\pi ft + \Phi)$ 来表示，使其幅度 A 、频率 f 或相位 Φ 随基带信号而变化，称为对载波进行调制。
- 基本的调制方法：
 - **调幅**(AM)：载波的振幅随基带数字信号而变化。
 - **调频**(FM)：载波的频率随基带数字信号而变化。
 - **调相**(PM)：载波的初始相位随基带数字信号而变化。

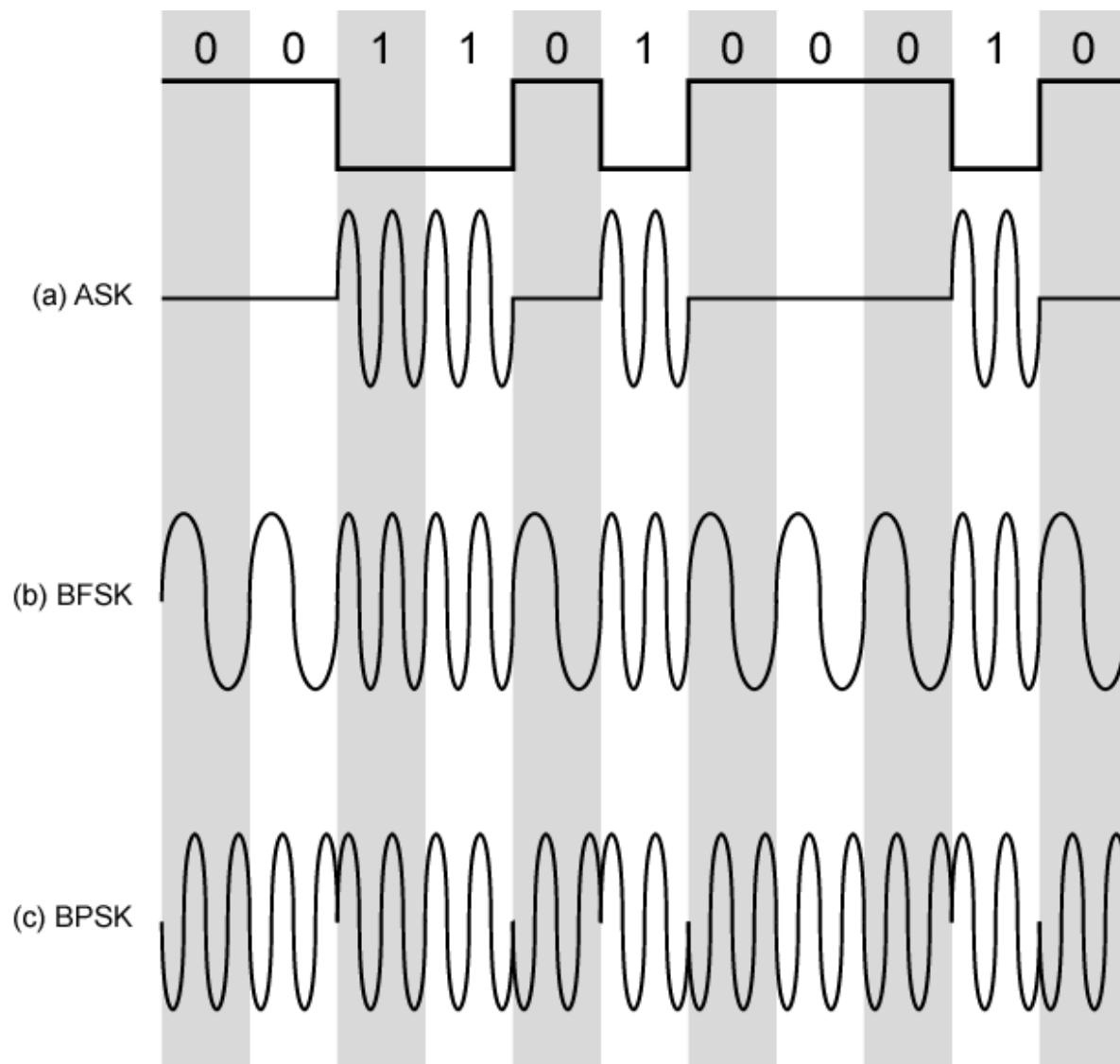
数字调制技术（续）

数字信号

调幅

调频

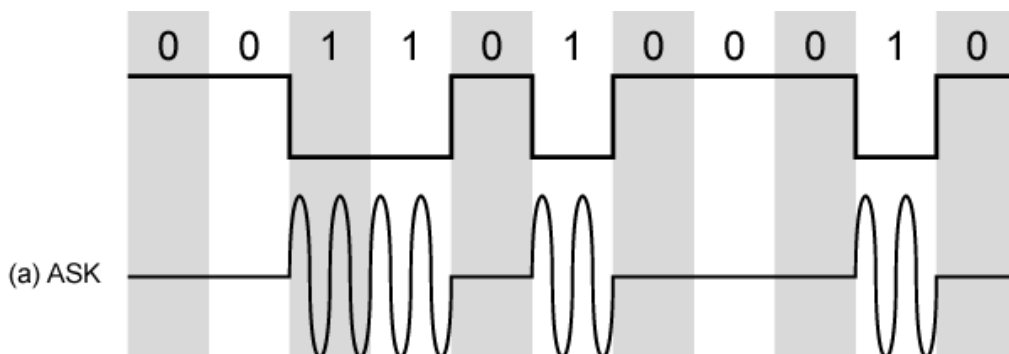
调相



调幅

- 在幅度调制中，两个不同载波信号的幅值分别代表二进制数字0和1。有时，也用恒定幅度的载波的有或无来表示数字0和1。

$$s(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi ft) & \text{binary } 1 \\ 0 & \text{binary } 0 \end{cases}$$

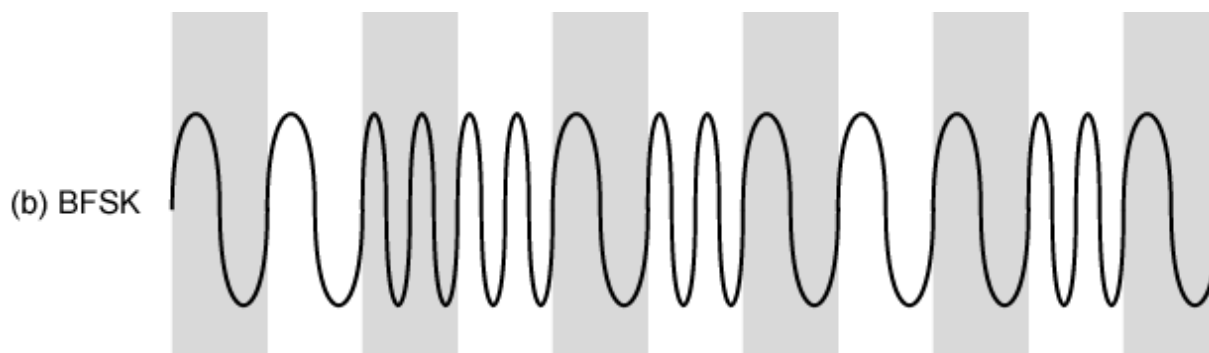


调频

- 频率调制是用两个不同频率的载波分别代表数字0和1

$$s(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A \sin(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

- 频率调制的抗干扰能力优于调幅，但频带利用率不高，常用于传输低速数字信号。

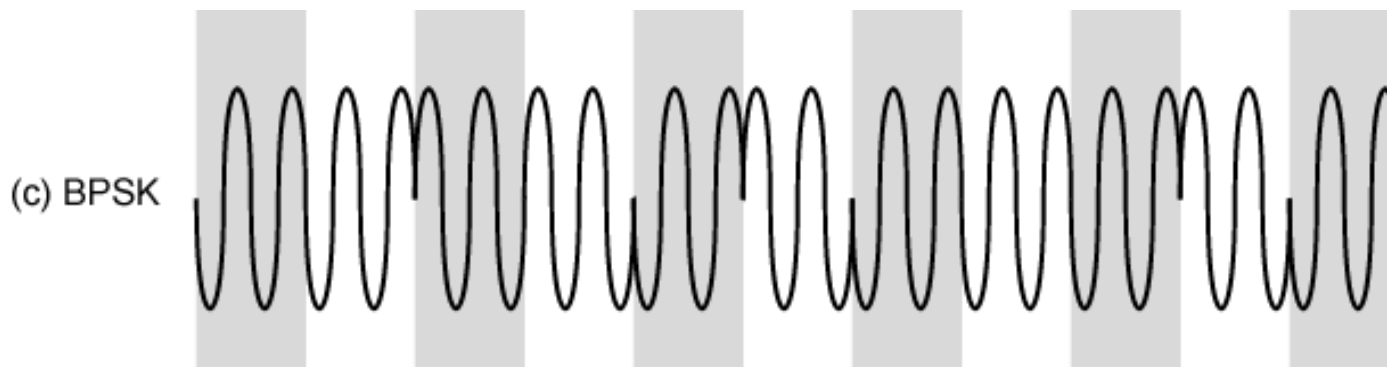


调相

- 相位调制是用不同相位的载波，如用相位为0和 π 的载波分别表示数字0和1，即公式。

$$s(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f t + \pi) & \text{binary } 1 \\ A \sin(2\pi f t) & \text{binary } 0 \end{cases}$$

- BPSK (Binary Phase Shift Keying): 信号波形



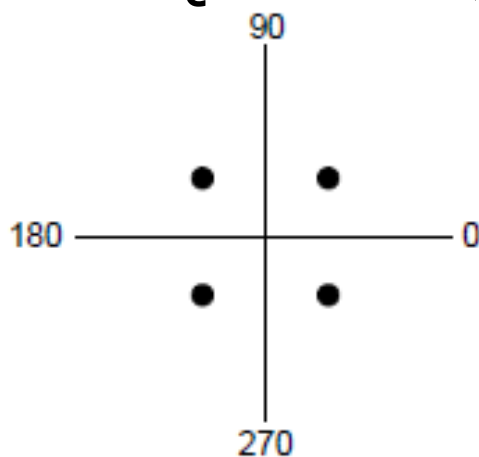
调制

■ QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) :

- 用信号的 45° , 135° , 225° , 315° 表示2比特
- 联合信号的幅度和相位，使一个符号表示更多的比特。黑点表示合法的幅度和相位

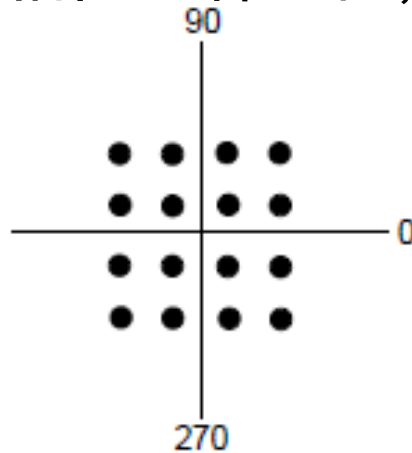
■ QAM(Quadrature Amplitude Modulation)

- QAM-16: 振幅相位16种组合，可表示4比特



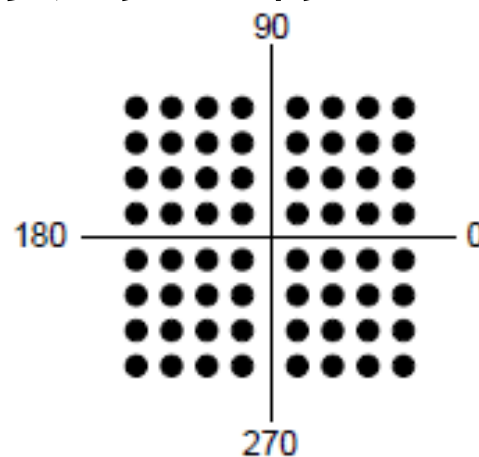
(a)

(a) QPSK.



(b)

(b) QAM-16.



(c)

(c) QAM-64.



提纲

- 物理层：定义了为建立、维护和拆除物理链路所需的机械的、电气的、功能的和规程的特性，其作用是使比特流能在物理媒体上传输。提供的服务包括：
 - (1) 提供传送和接收比特流的能力，物理连接的建立、维持和释放问题。
 - (2) 在两个相邻系统之间唯一地标识数据电路。
- 数据传输理论：信道传输的限制
- 传输介质：常用传输介质的特性
- 数字调制技术：比特与信号间的转换技术
- 信道复用：在一条传输介质上提供多个数据传输信道的方法

信道复用技术

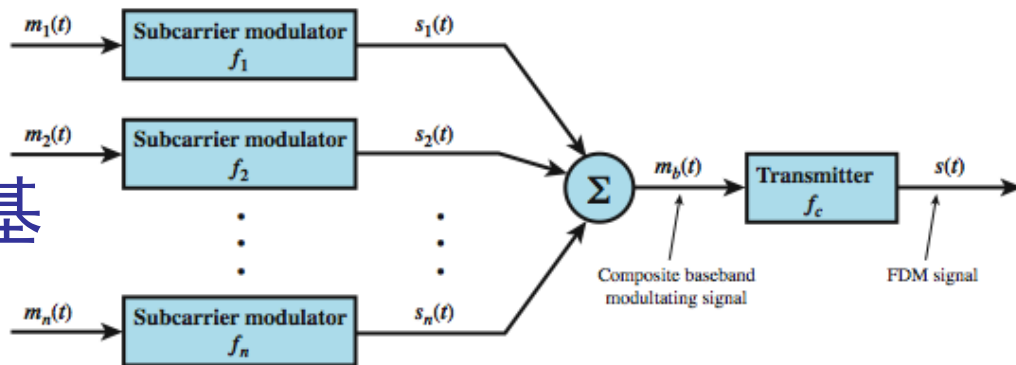
- 复用技术(multiplexing): 在一条传输线路上传输多路信号的技术
- 分类: 频分复用、时分复用、码分复用
 - 频分复用(FDM:frequency division multiplexing): 信号在同样时间占用不同频段。
 - 时分复用(TDM:Time Division Multiplexing): 信号在不同时间占用同样频段。



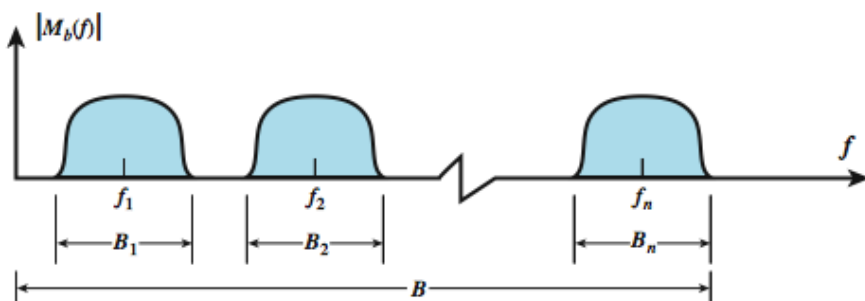
频分复用

- 当信道带宽为每路基带信号带宽的 N 倍时，将信道分割为 N 个子信道，在每个子信道上上传一路信号。

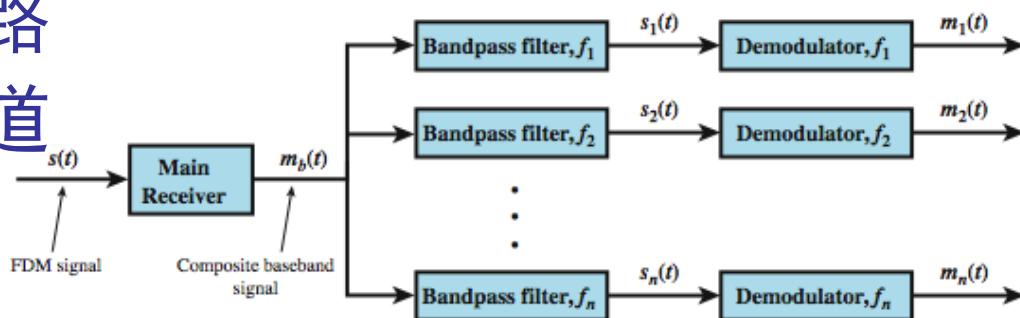
- 子信道间有保护间隔
- 各路基带信号调制不同频率的载波，将各路信号搬移到各个子信道上。



(a) Transmitter



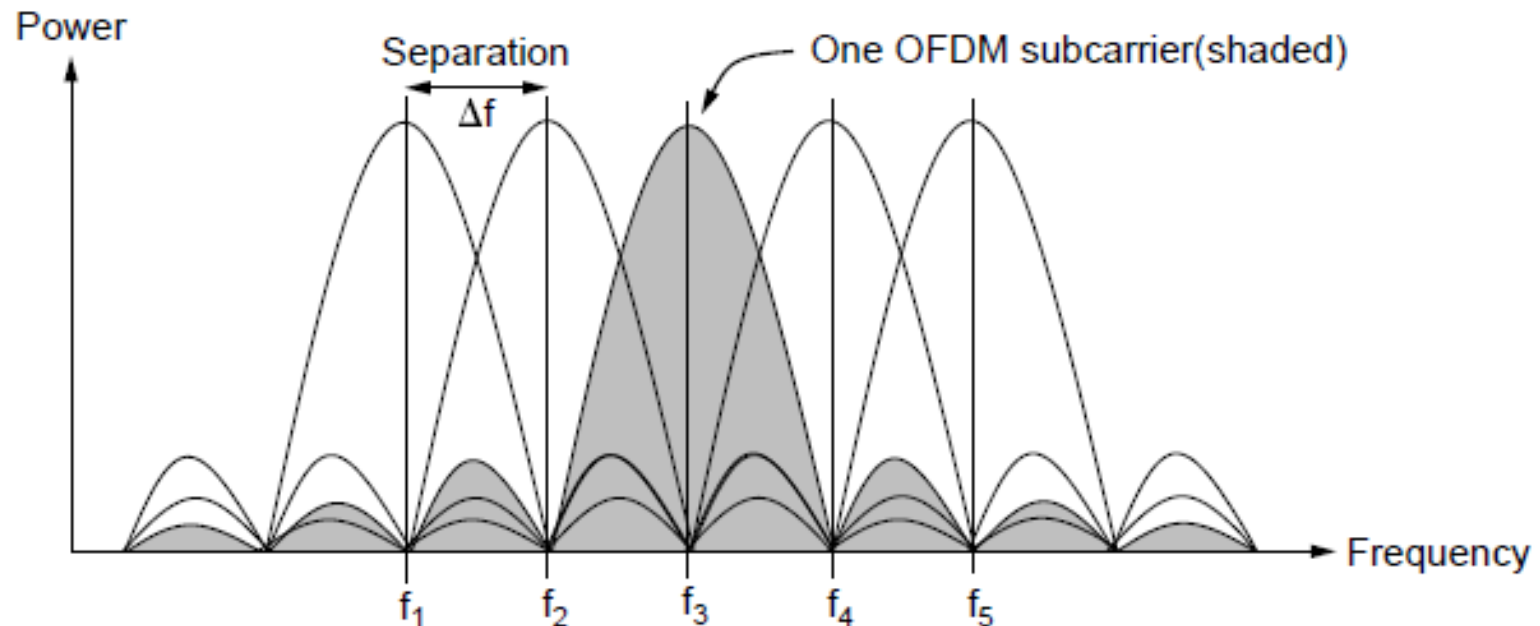
(b) Spectrum of composite baseband modulating signal



(c) Receiver

OFDM (M为调制, 不是复用)

- 各子载波正交OFDM (Orthogonal frequency division Modulation)
 - 在某一子载波的中心采样, 则其它子载波的干扰为0
- 子载波间没有保护间隔, 更有效地利用带宽
- 要求子载波间严格正交, 接收的频率严格对准



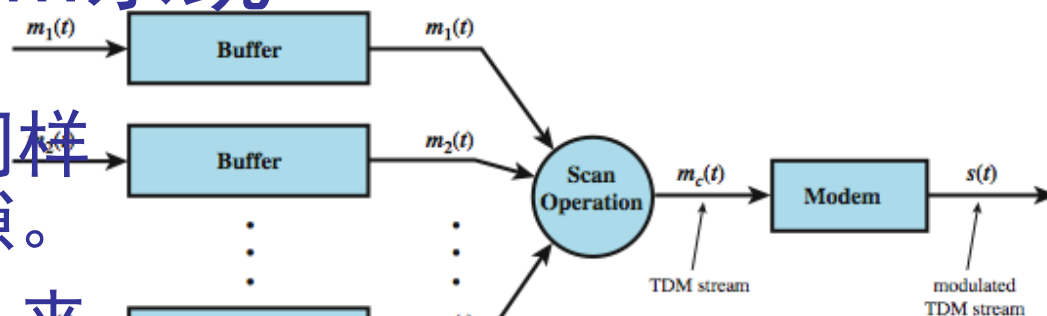


频分复用举例

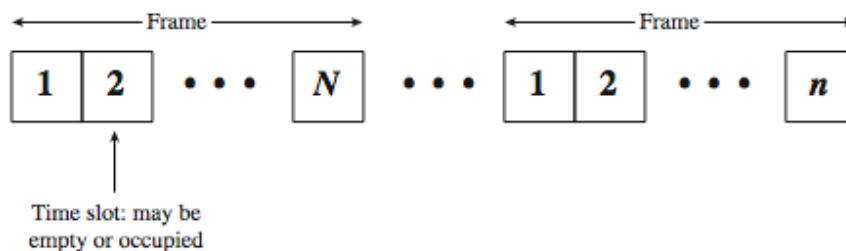
- 广播系统，电话系统，电视系统；
- 已知话音信号的带宽为4kHz，标准的FDM是将12路话音信号频分复用到一条48kHz的线路上，称之为群，可以是12kHz--60kHz或60kHz--108kHz等。5个群又可被频分复用为240kHz带宽的超群（含60路话音信道）。

时分复用TDM系统

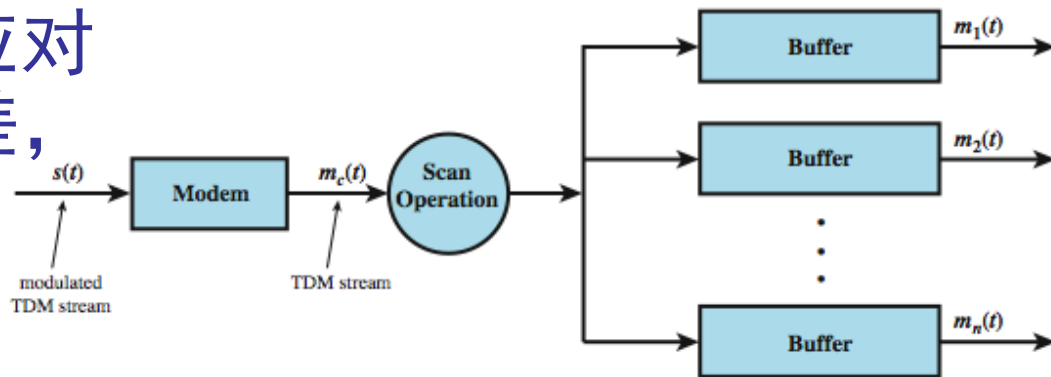
- 所有用户占用同样频带的不同时隙。
- 用户按照“轮”来访问信道；在每一轮，每个站得到固定长度的时隙
- 用户之间要同步
- 需要在时隙之间设置保护间隔，应对用户同步的偏差，以及远近效应



(a) Transmitter



(b) TDM Frames



(c) Receiver



Code Division Multiple (CDM)

- 从代码集 C_k 选取特有的“码序列”分配给每个用户，码序列的特点是

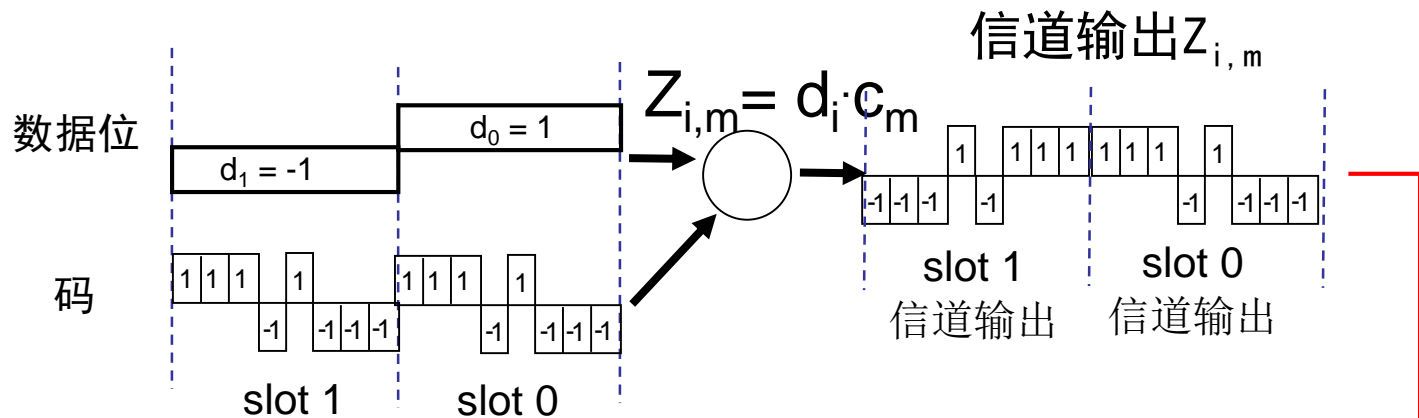
$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{ki} C_{ji} = C$$

若 $K=j$ ，则 $C=1$ ；若 $K \neq j$ ，则 $C=0$ ；称这些码序列是“正交”的

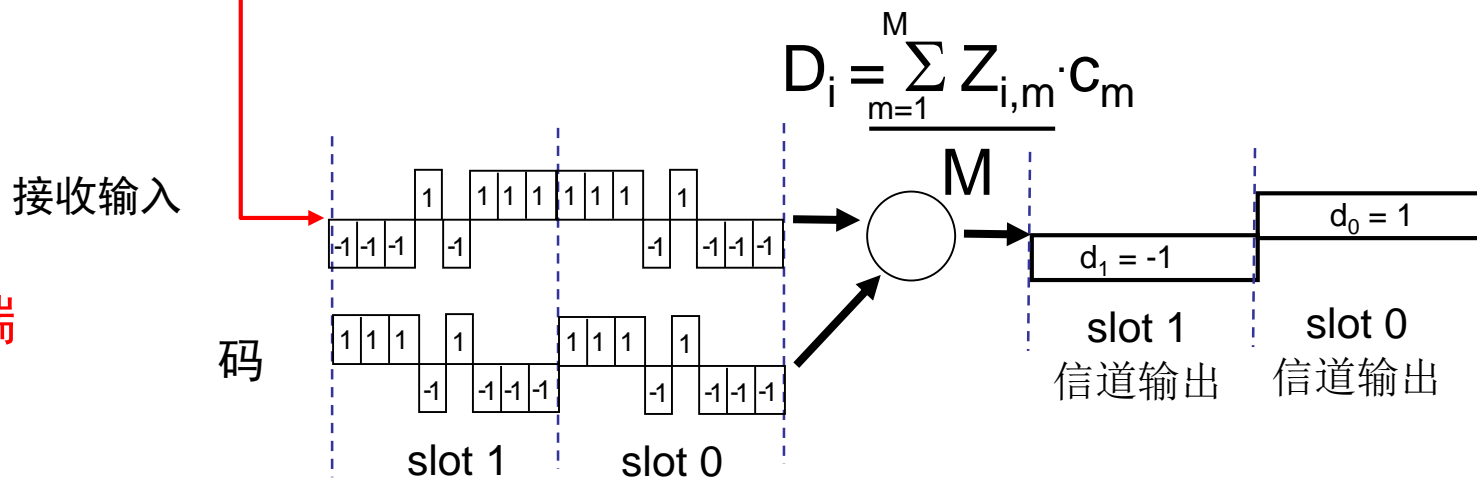
- 所有用户共享相同的频率，但每个用户用自己的码序列对数据进行编码或调制
- 编码信号=(原始数据) \times (码序列)
- 解码：编码信号与码序列的乘积
- 允许多个用户“共存”并同时传输，具有最小的干扰(因为码是“正交”的)

CDM 编码/解码

发端

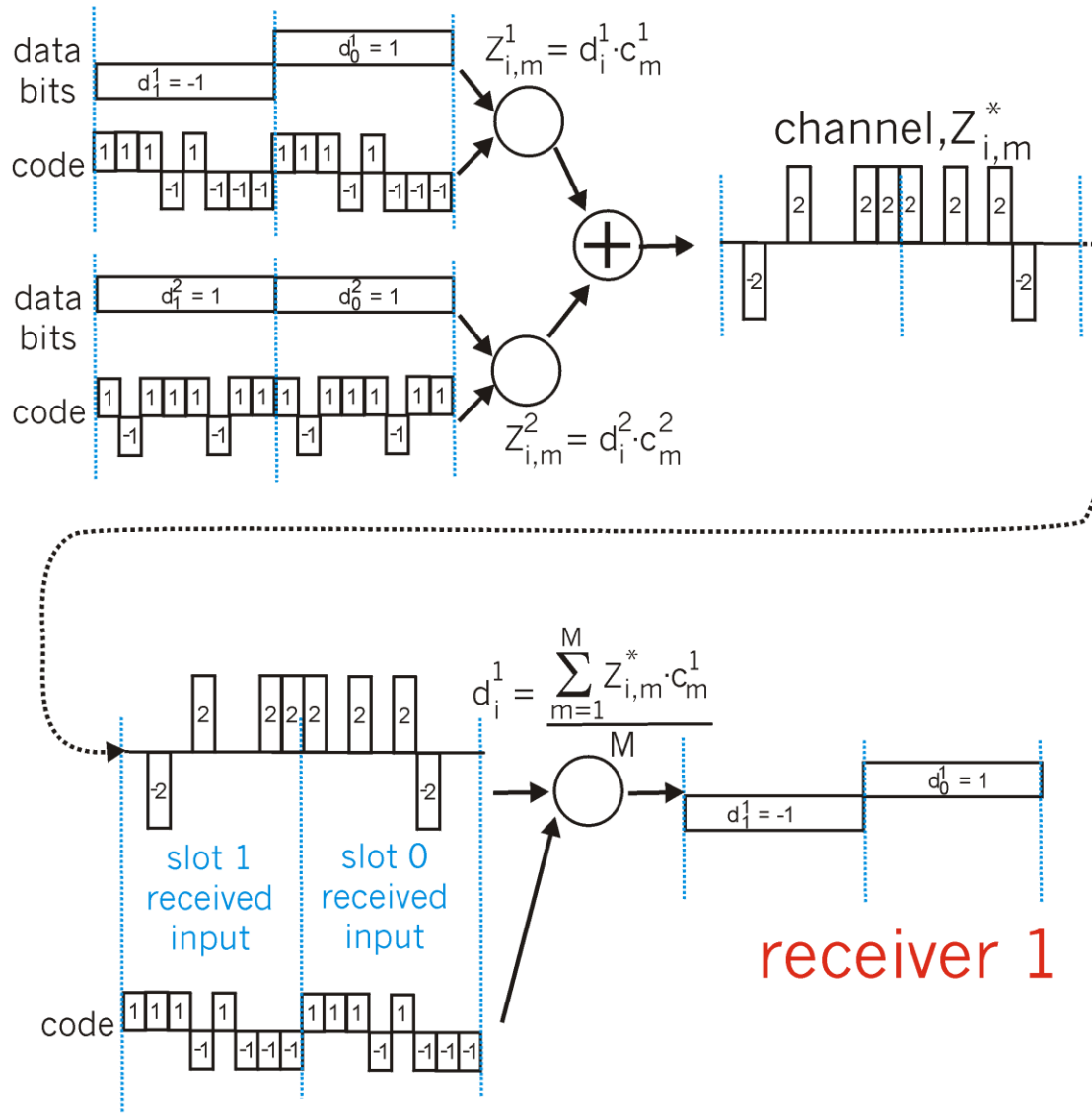


收端



CDM: 两个发端的干扰

senders





Code Division Multiplexing (CDM)

- CDMA, Code Division Multiple Access 码分多址
- 为无线广播信道(蜂窝系统、卫星系统)的标准
- 扩展频谱：通常码片速率为信息速率的m倍

编码信号=(原始数据) \times (码片序列)

原始数据经过CDMA编码后，信号频谱被展宽，故称为扩频；例如原始速率为10Kbps，经过100倍扩频，码速率为1Mbps

补充



- 复用技术：在一条线路上传输多路信号
- 复用：发送多路信号，相对容易
 - FDMA、TDMA、CDMA、OFDM
- 解复用：从信号中恢复 n 路数据，相对复杂！需要MAC控制多路发送设备
 - FDMA：抑制带外信号，需要设置保护频段
 - TDMA：各信号严格同步，需要保护时间间隔
 - CDMA：需要功率控制
 - OFDM：需要各子载波的频率正交，频率对齐

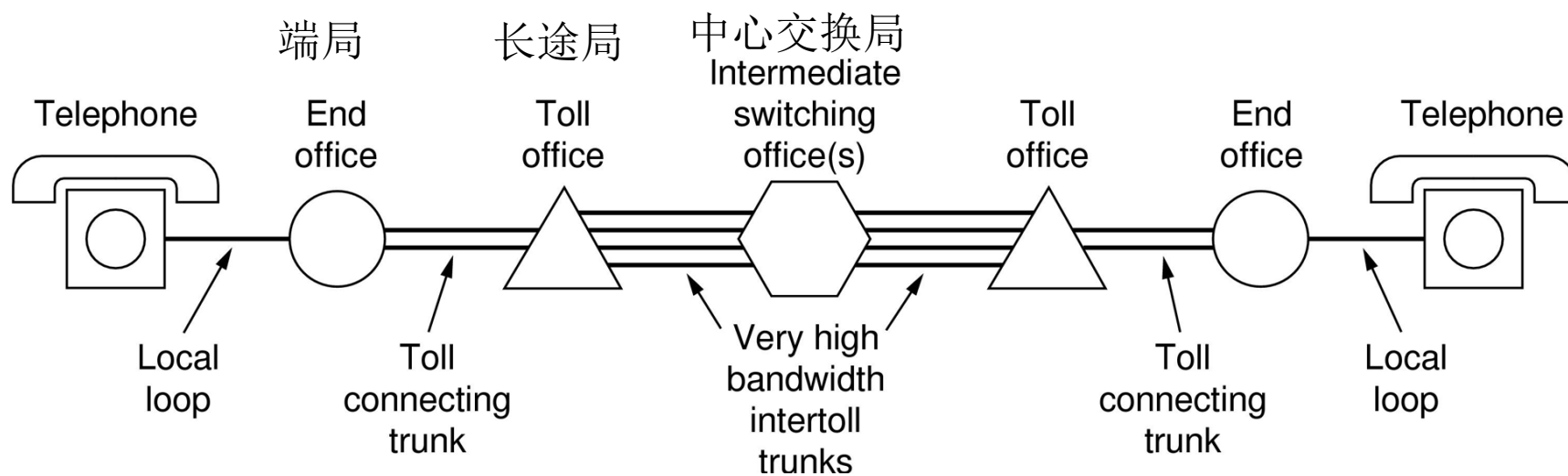


单工与双工

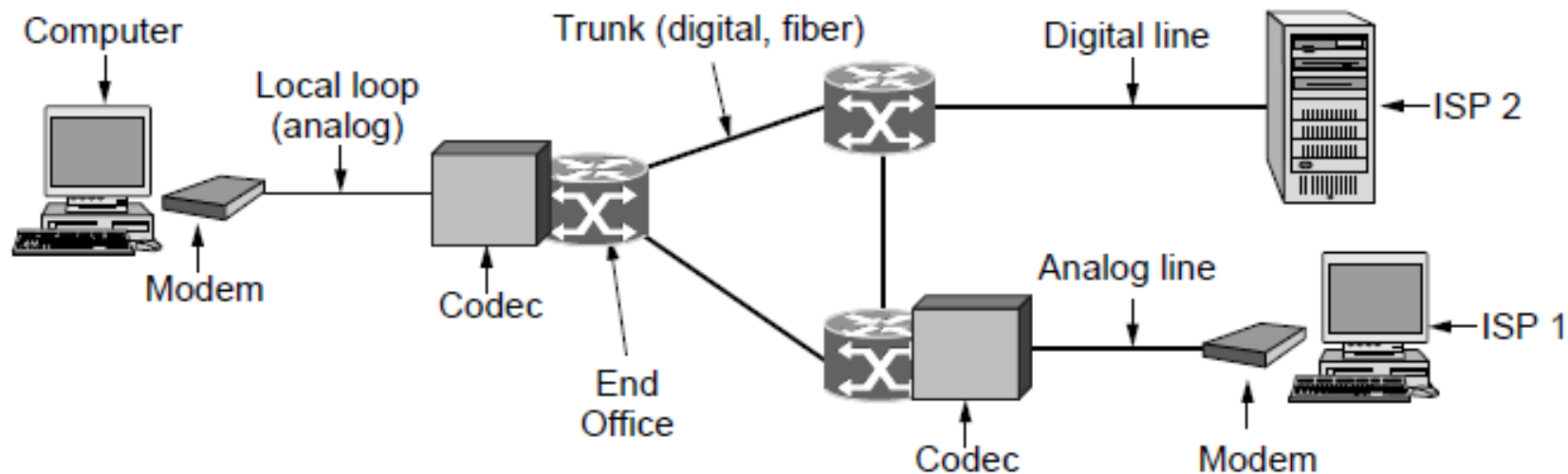
- 单工：信道只能在一个方向上传输数据
- 双工Duplex：信号可以在两个方向上同时传输数据，方法
 - TDD（Time Division Duplex）：时分双工
 - FDD（Frequency Division Duplex）：频分双工

电话系统

- 公用电话交换网PSTN (Public Switched Telephone Network)的主要组成
 - 本地环路：模拟双绞线，连接住宅、公司等
 - 干线：在交换局之间的数字光纤链路
 - 交换局：在干线之间转接呼叫



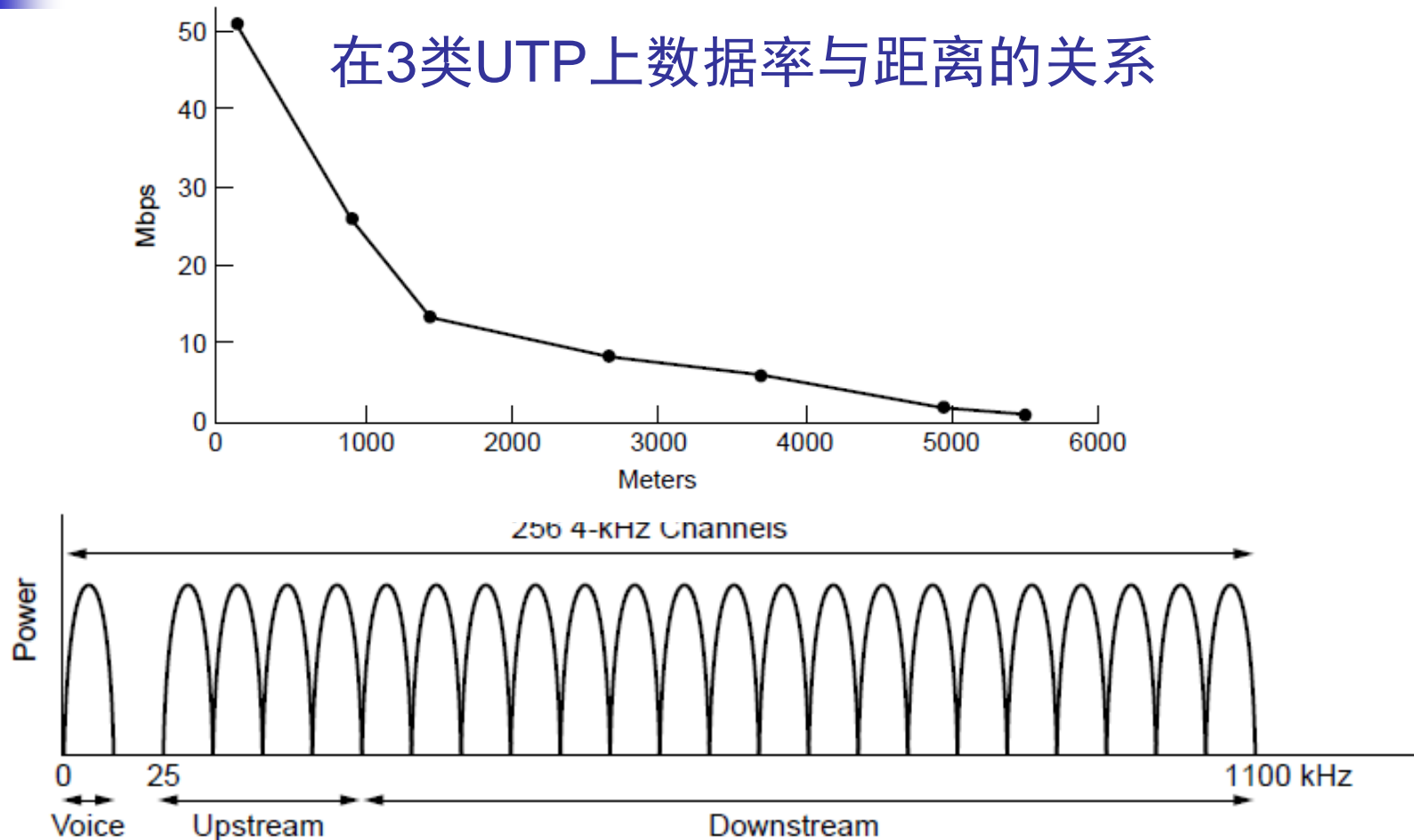
电话调制解调器



调制解调器和编码器完成计算机和传输设备之间的数字信号到模拟信号的转换

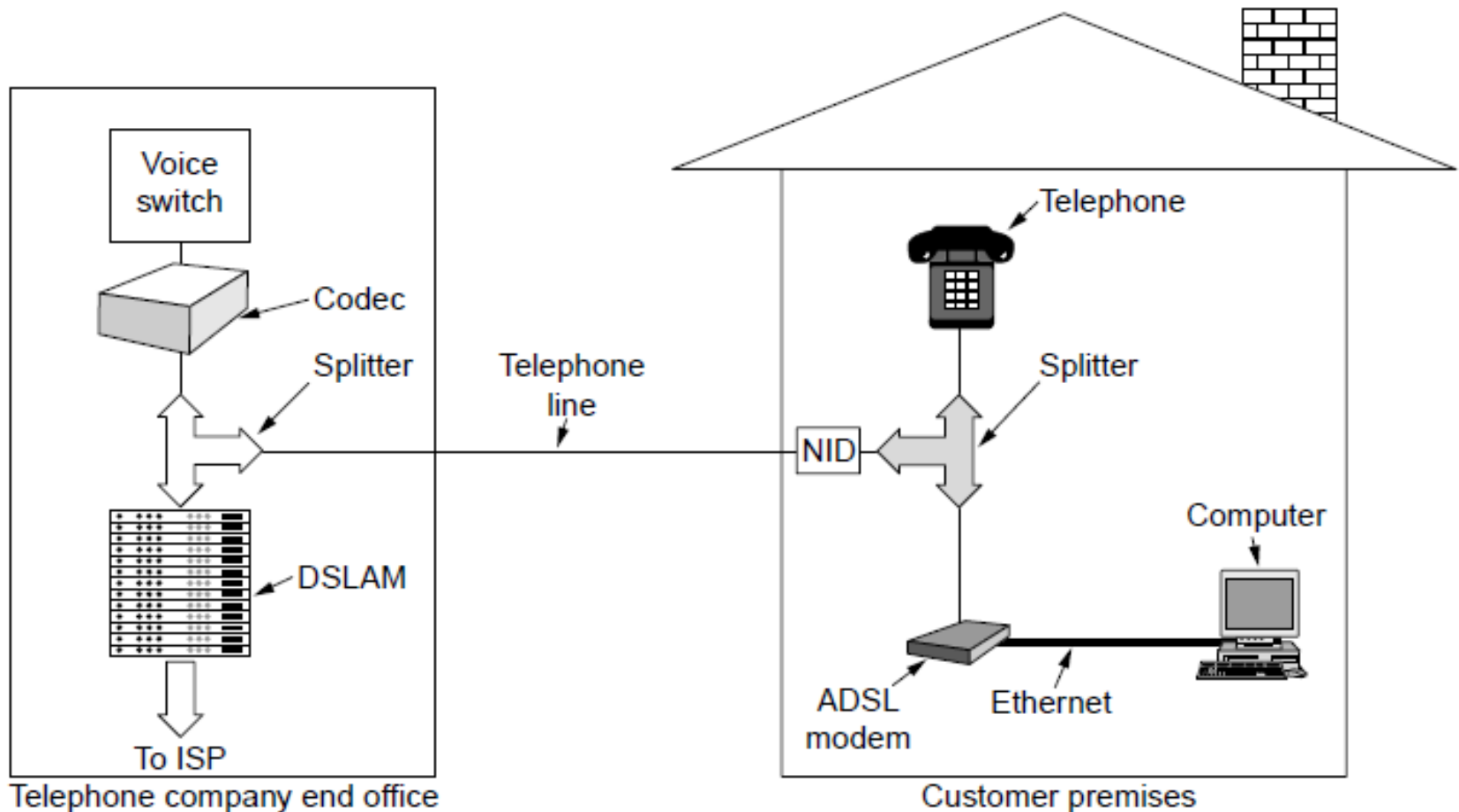
数字用户线DSL(Digital Subscriber Lines)

在3类UTP上数据率与距离的关系



离散多信道调制ADSL频谱方案, 4312.5Hz/信道,
ADSL标准 ITUG992.1, 上行1Mbps, 下行8Mbps

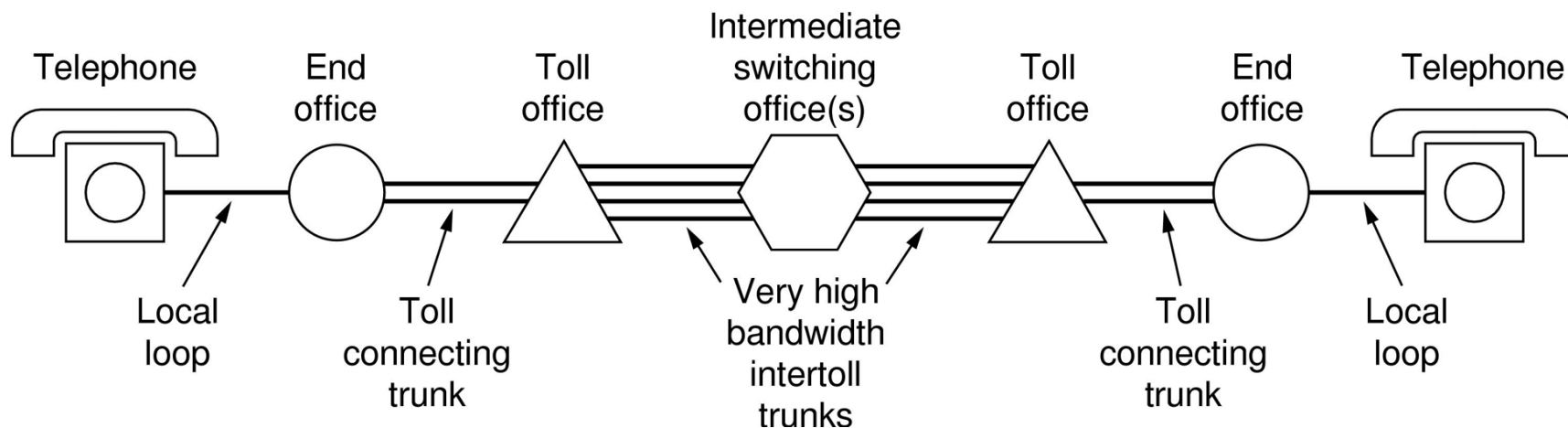
DSL



一个典型的ADSL设备配置
DSLAM: DSL接入复用

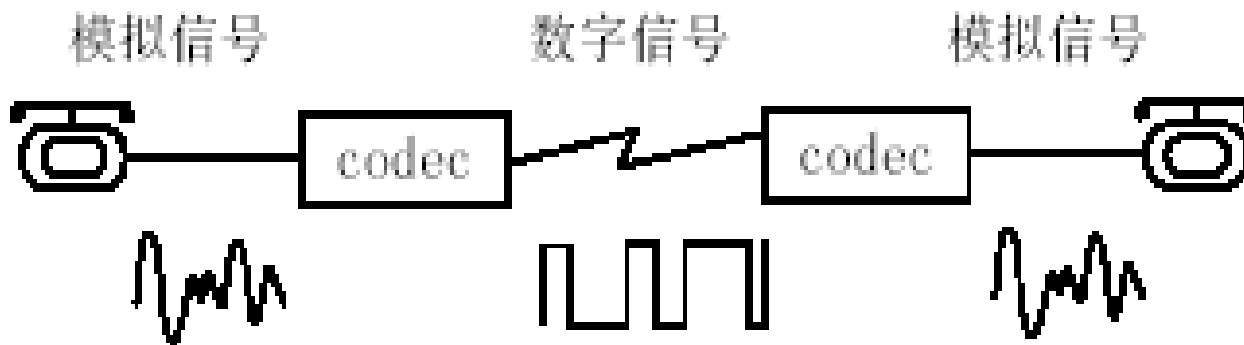
中继线与多路复用

- 中继线传输数字信号
- 汇集成百上千、数百万路的数字信号
- 模拟信号如何转换为数字信息？PCM



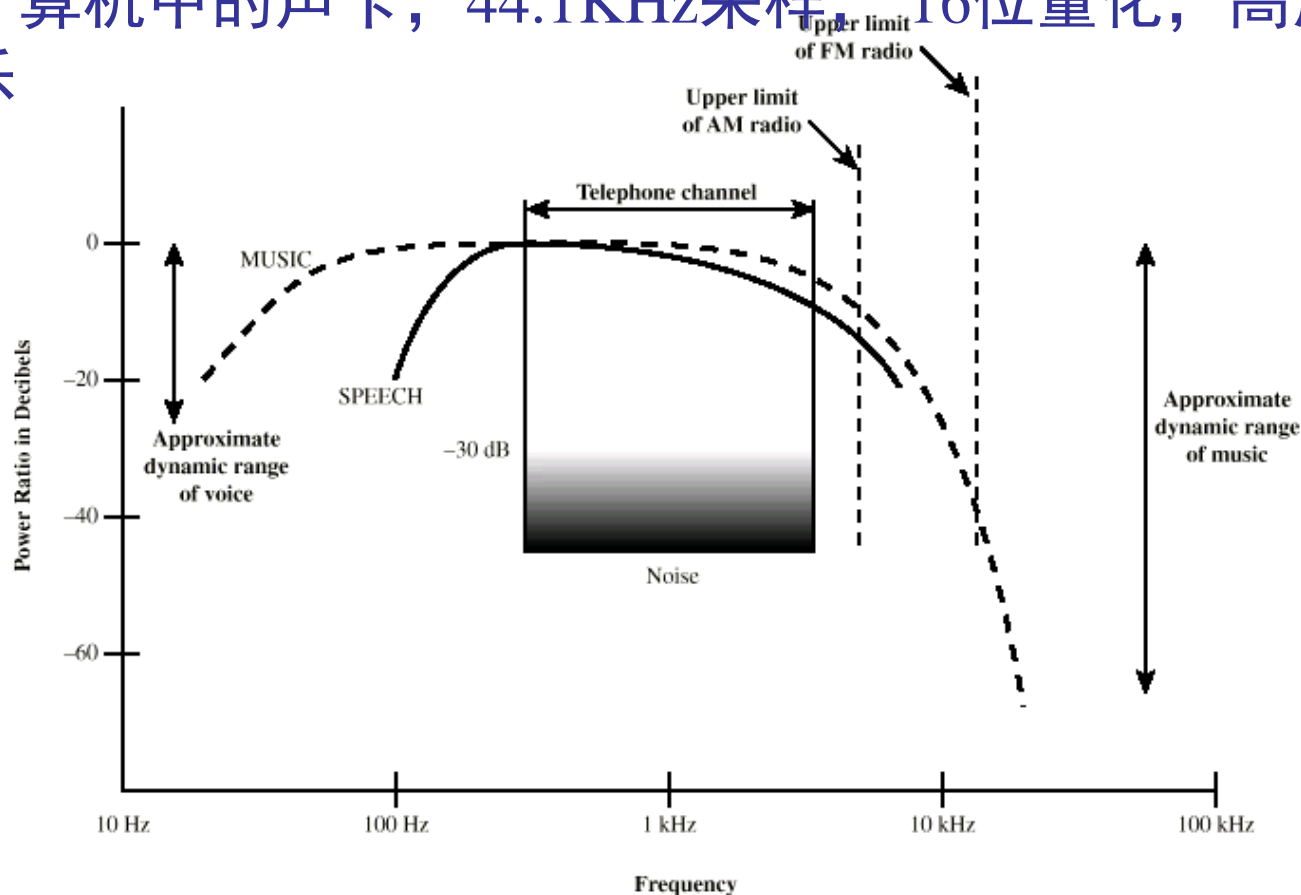
脉冲编码PCM

- **脉冲编码调制PCM** (Pulse Code Modulation) 是将模拟信号变换为数字信号的方法，包括**采样**、**量化**和**编码**三个步骤。
- 编解码器codec



声音信号的数字化

- 声音信号的带宽20Hz~20KHz
- 电话系统中的语音信号带宽为4KHz；8KHz采样，8位量化，产生64Kbps的数字化语音
- 计算机中的声卡，44.1KHz采样，16位量化，高质量的音乐





模拟→数字 脉冲编码PCM(续)

■ 采样

- 按一定时间间隔对模拟信号的幅值进行采样测量。
- 根据奈奎斯特定理，若模拟信号带宽为 $W\text{Hz}$ ，当采样频率为 $2W$ 时，则数字信号足以捕获原模拟信号的信息。

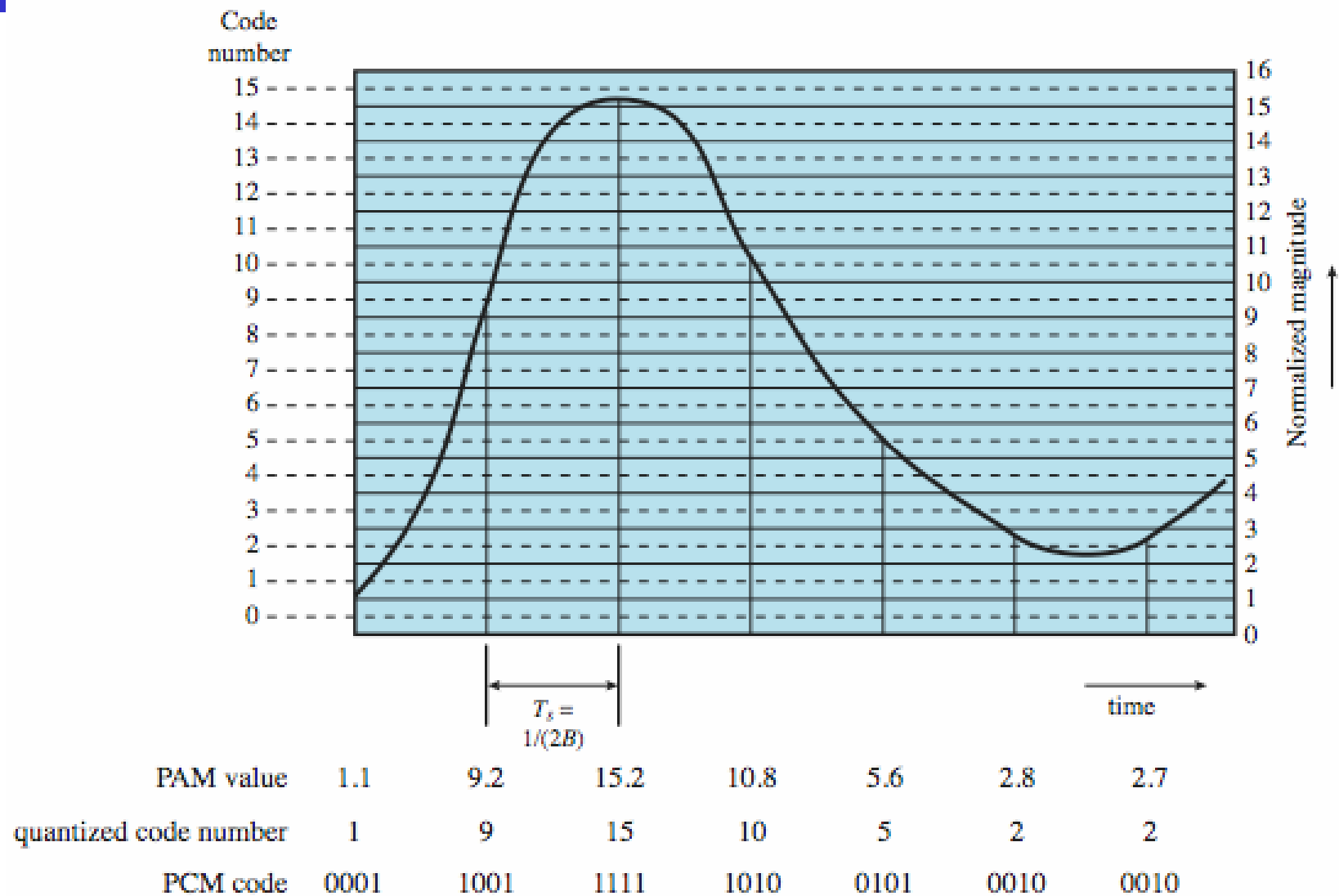
■ 量化

- 对取样点的信号幅值分级取整。
- 量化就是将模拟信号的最大可能幅值分为若干级（通常为 2^n 级），而后测量幅值，按此分级舍入取整，得到一个正整数。

■ 编码

- 将量化后的整数值用二进制数来表示。

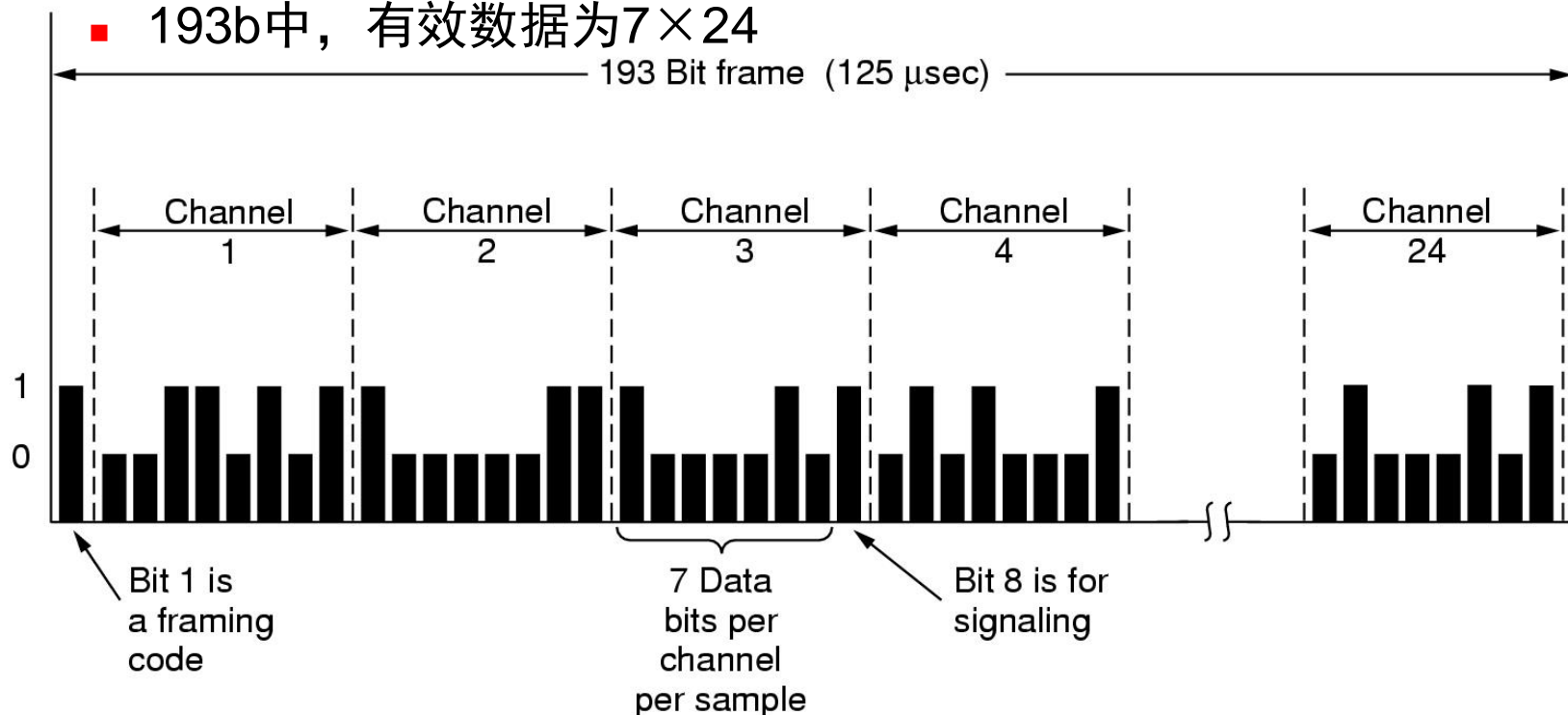
脉冲编码PCM例子



TDM复用——T1标准

- 长距离链路用TDM传输语音和数据混合信号
- 24个信道的总数据率为1.544 Mbps
- 每个信道含8位数据(其中7位为语音数据, 1位为信令), 数据率为56 kbps

■ 193b中, 有效数据为 7×24





T1标准

- T1 支持的总速率

$$\begin{aligned} & [(7+1) \times 24 + 1] / 125 \times 10^6 \\ &= 193 \text{ bit} / 125 \times 10^6 \\ &= 1.544\text{Mbps} \end{aligned}$$

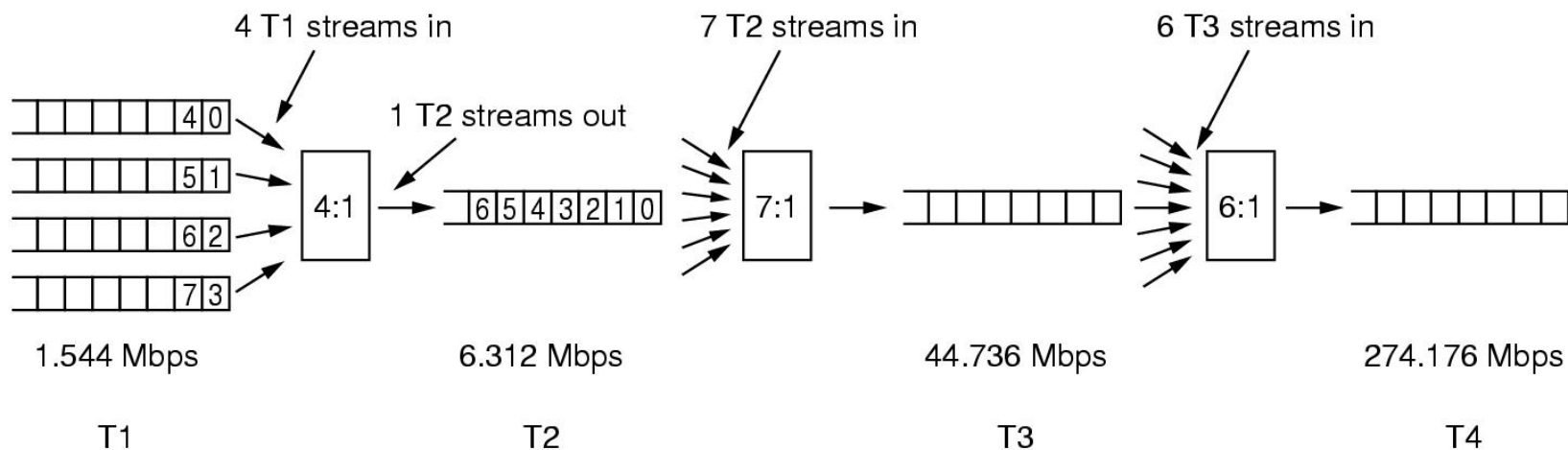
- E1: 2.048Mbps

$$8 \times 32 \times 1/125 \times 10^6 = 2.048\text{Mbps}$$

在32个子信道中，30个用来传输话音，另外2个用于传输控制信号及帧同步。

TDM信号的复接

- 二次群速率T2: 6.312 Mbps; E2: 8.848Mbps
- 三次群速率T3: 44.736Mbps; E3: 34.304Mbps
- 四次群速率T4: 274.176Mbps; E4: 139.264Mbps





数字传输网的标准

- 传输TDM的群路信号

- 两类速率等级信号：

- PDH（Plesiochronous Digital Hierarchy，准同步数字系列）：各路信号的时钟频率有一定偏差，复接时需要插入一定数量的脉冲实现各路同步。
- SDH（Synchronous Digital Hierarchy，同步数字系列）：1985年贝尔实验室提出SONET（Synchronous Optical NETwork，同步光网络），1986年成为美国标准。1988年CCITT将SONET命名为SDH，作为光纤、微波、卫星传送技术。系统由一个精度达 10^{-9} 主时钟控制，精准同步，易于复接和分接。

SONET/SDH的速率及复用

■ SONET基本帧：

- SONET的基本信道：每 $125\mu\text{s}$ 传输810字节（90列 \times 9行），数据速率 = $8 \text{ bit} \times 810 \text{ Byte} \times 8\text{KHz} = 51.84 \text{ Mbps}$ ，称为**STS-1同步传输信号**（Synchronous Transport Signal-1）。
- 多路STS-1复用：3路STS-1合成为STS-3，**155.52 Mbps**（ $= 51.84 \times 3 \text{ Mbps}$ ），STS- n 的光纤线路被称作OC- n （Optical Carrier Level）。

■ SDH基本帧

- 从OC-3 **155.52 Mbps**开始，称作同步传输模块**STM-1**（Synchronous Transport Module-1）。
- OC- n 表示由 n 路OC-1线路组成

SONET/SDH的速率及复用

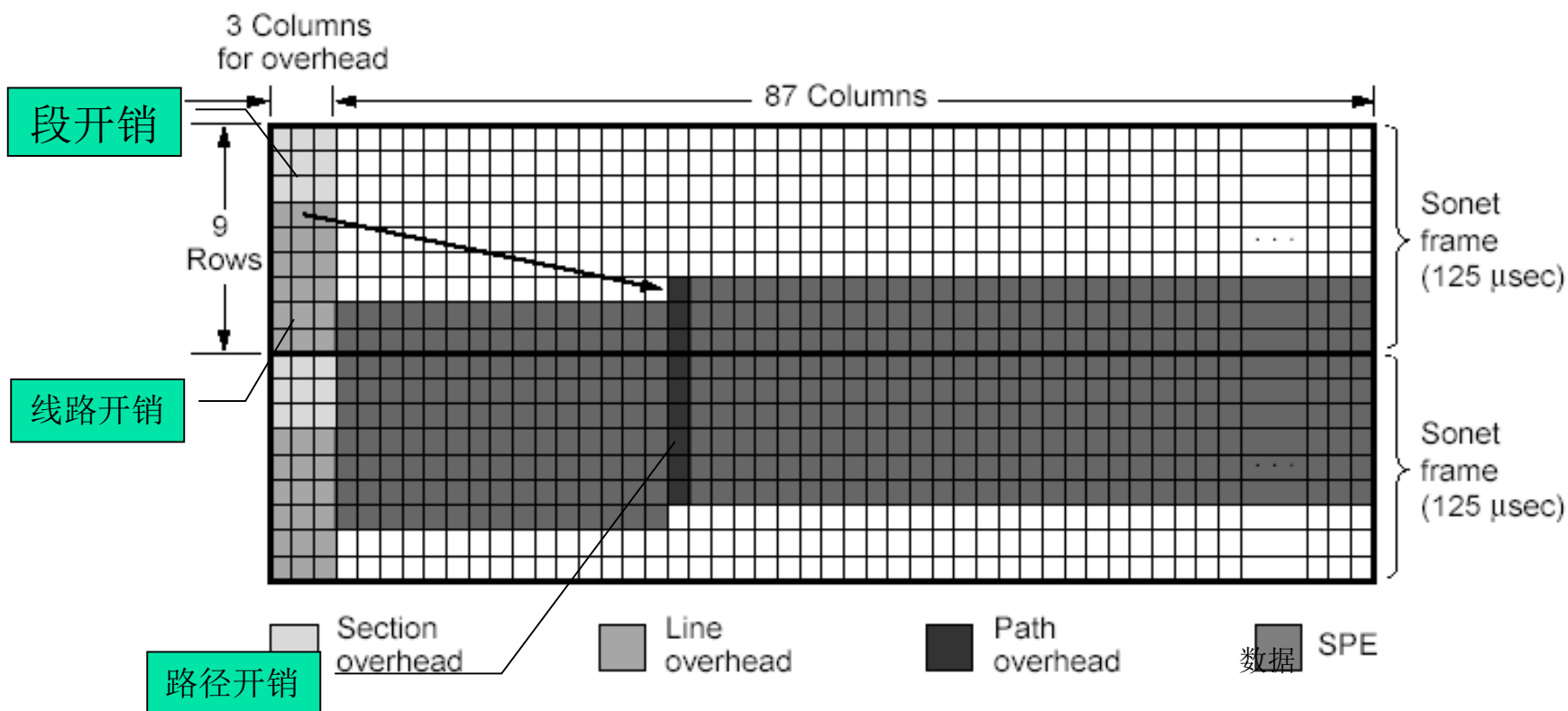
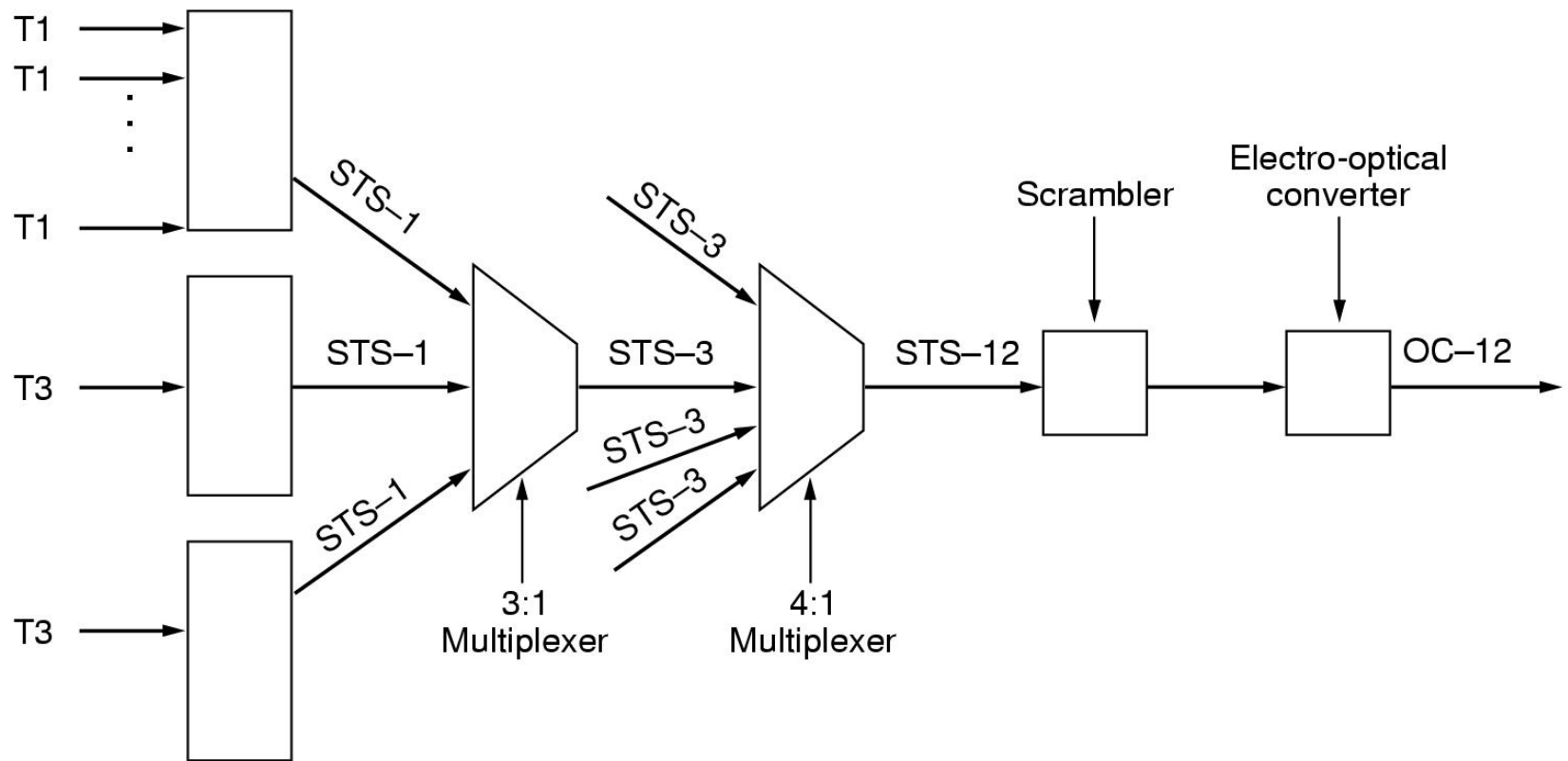


Fig. 2-30. Two back-to-back SONET frames.

SONET/SDH

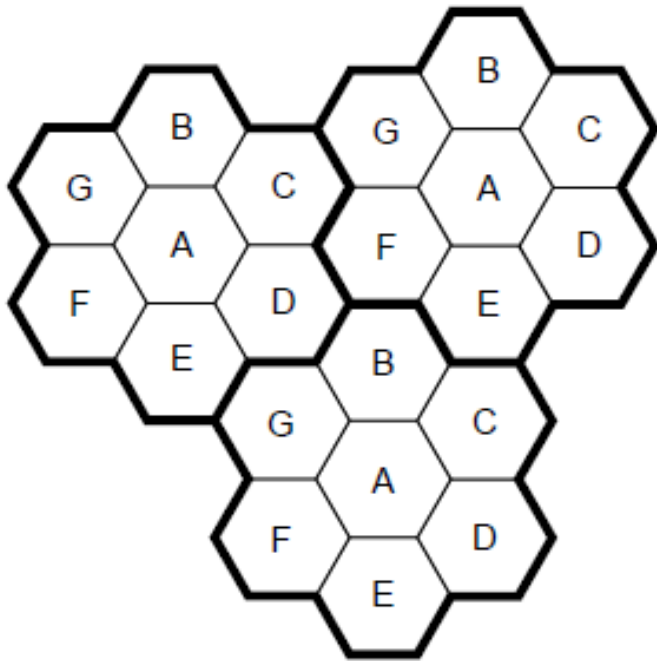


SONET/SDH的速率等级

SDH等级		SONET等级	标准速率 (Mbps)
		OC-1/STS-1 (480 CH)	51.8400
155 Mbps	STM-1 (1920 CH)	OC-3/STS-3 (1440 CH)	155.520
	STM-3	OC-9/STS-9	466.560
622 Mbps	STM-4 (7696 CH)	OC-12/STS-12 (8046 CH)	622.080
	STM-6	OC-18/STS-18	933.120
	STM-8	OC-24/STS-24	1244.160
	STM-12	OC-36/STS-36	1866.240
2.5 Gbps	STM-16 (30720 CH)	OC-48/STS-48 (32356 CH)	2488.320
10 Gbps	STM-64 (122880CH)	OC-192/STS-192 (129024 CH)	9953.280

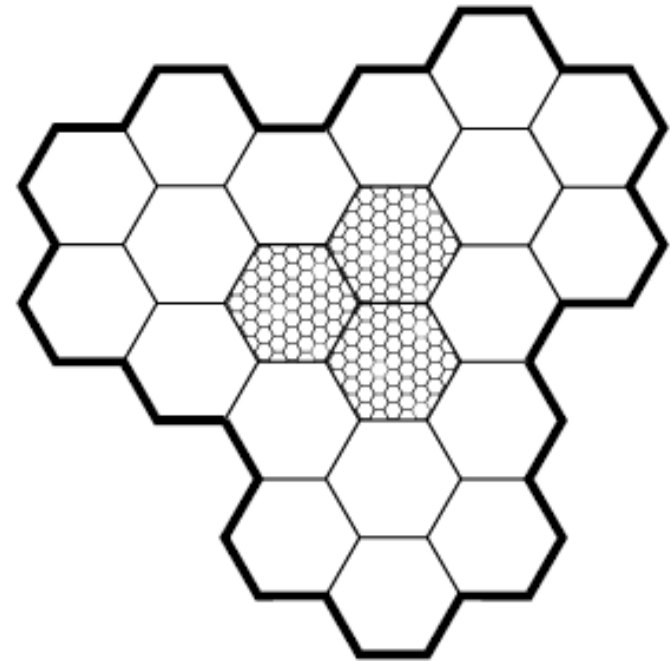
移动通信系统的信道复用

- 1G: 模拟话音
- 2G: 数字话音
- 3G: 数字话音+数据
- 4G: 更高速的数据



(a)

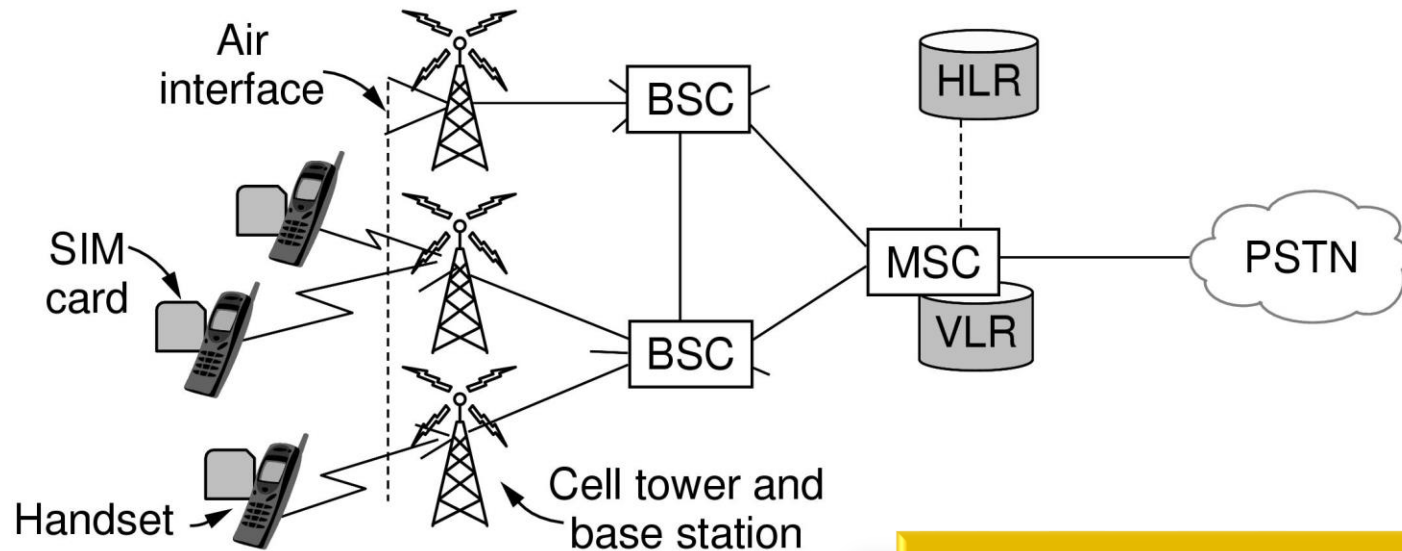
(a) 小区频率在更远距离处被重用



(b)

(b) 为增加用户数，将小区划分得更小

GSM (1)



SIM – Subscriber Identity Module
BSC – Base Station Controller
VLR – Visitor Location Register
HLR – Home location Register

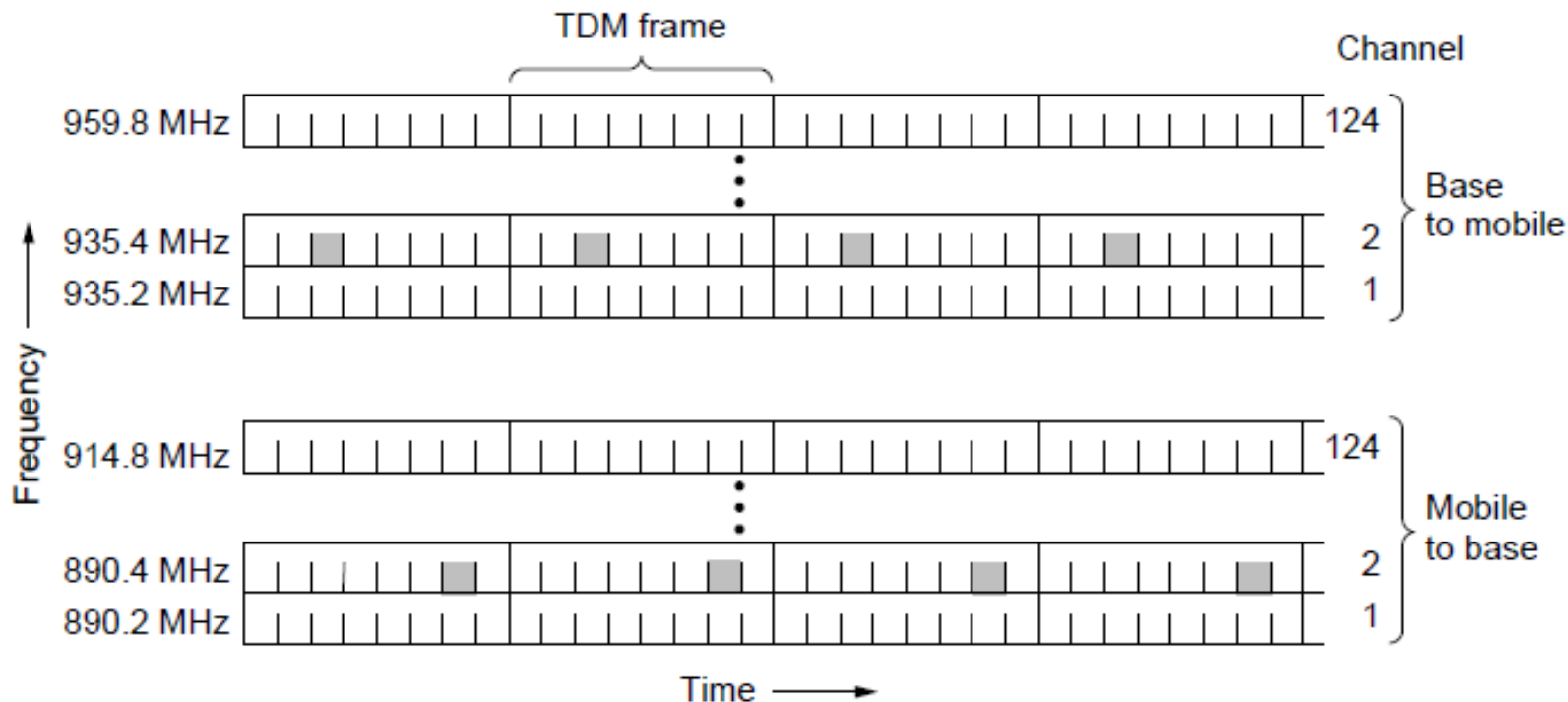
GSM 移动网络结构



GSM

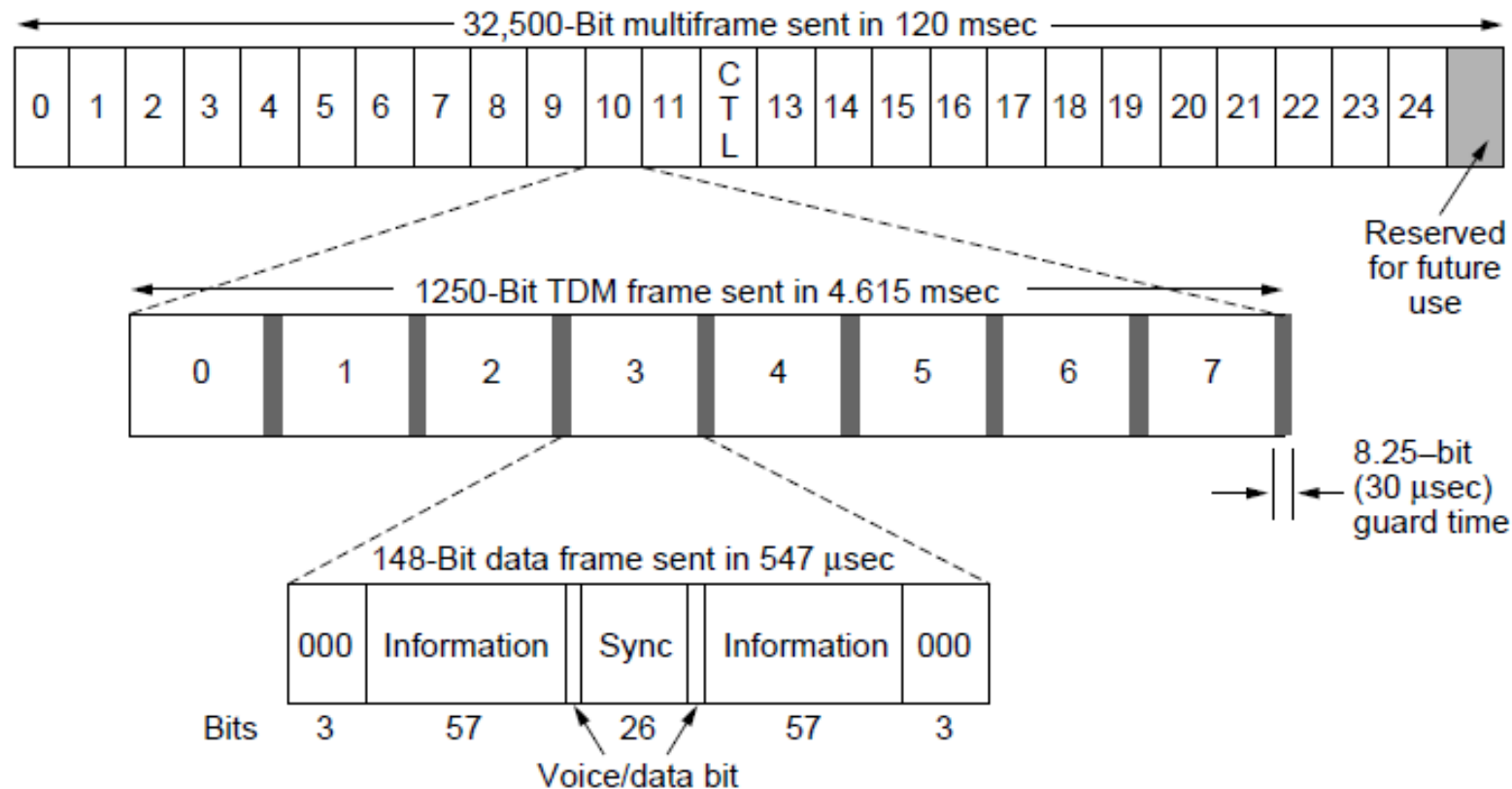
- GSM—Global System for Mobile Communications
- 频率范围:
 - 900 MHz （下行890–915MHz， 上行935–960MHz）
 - 1800 MHz
 - 1900 MHz
- 手机发送频率比其接收频率高 45MHz
- GSM无线信道带宽为 200 kHz
- 在每个200 kHz的子信道上采用TDM

GSM (2)



GSM 在频率域上划分为124个信道
每个信道8个时隙组成一个TDM帧

GSM (3)



GSM 帧结构



如何理解几种复用技术

- FDM: 2G蜂窝系统, 无线电台、电视系统
- TDM: 用于GSM蜂窝系统
- CDM: 干扰受限的系统, 用于IS95, 3G蜂窝系统

5G移动通信

- 频率越高，带宽越宽，速率越高

- 4G（LTE）频段

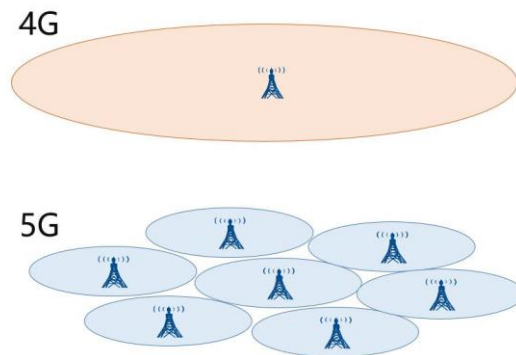
我国 LTE 频谱划分

归属方	TDD		FDD		合计
	频谱	频谱资源	频谱	频谱资源	
中国移动	1880-1900MHz	20M			130M
	2320-2370MHz	50M			
	2575-2635MHz	60M			
中国联通	2300-2320MHz	20M	1955-1980MHz	25M	90M
	2555-2575MHz	20M	2145-2170MHz	25M	
中国电信	2370-2390MHz	20M	1755-1785MHz	30M	100M
	2635-2655MHz	20M	1850-1880MHz	30M	

资料来源：工信部、招商证券

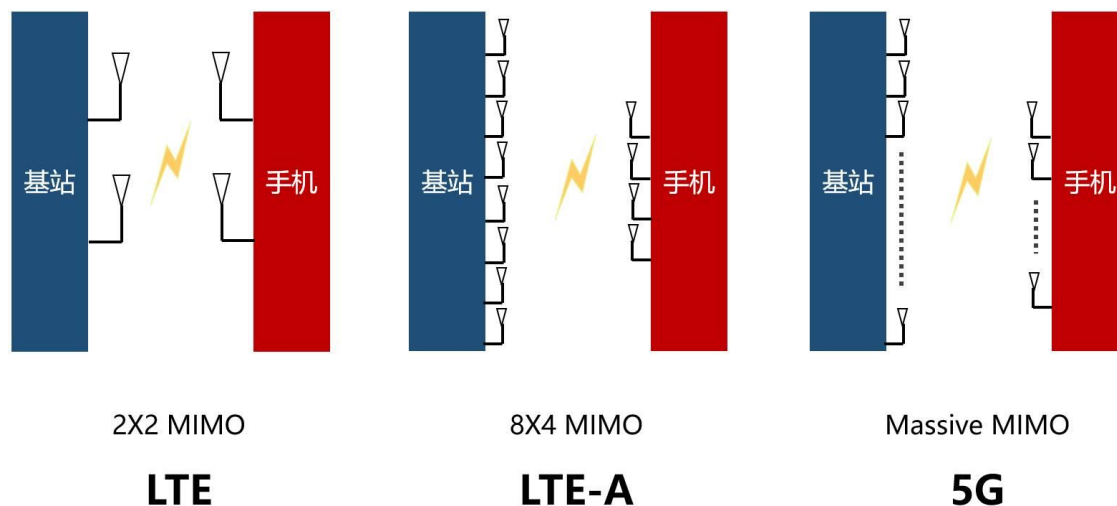
- 5G频段：3.3-3.6GHz、4.8-5GHz

- 频率越高越趋近于直线传播、衰减越大、蜂窝变小



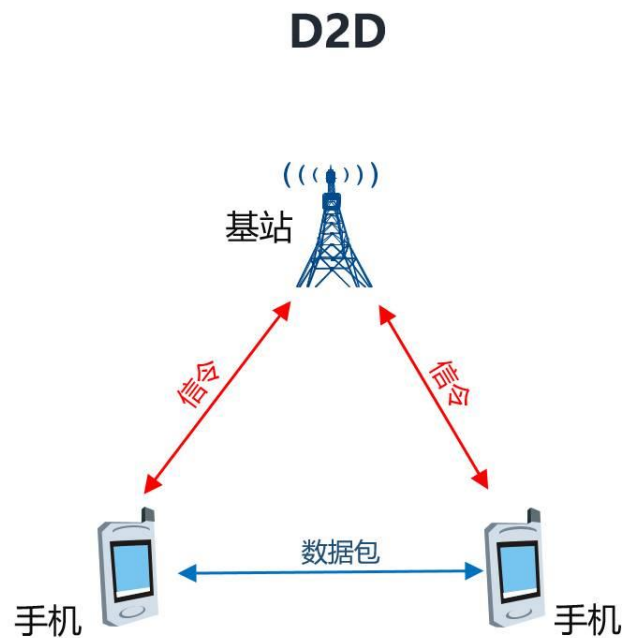
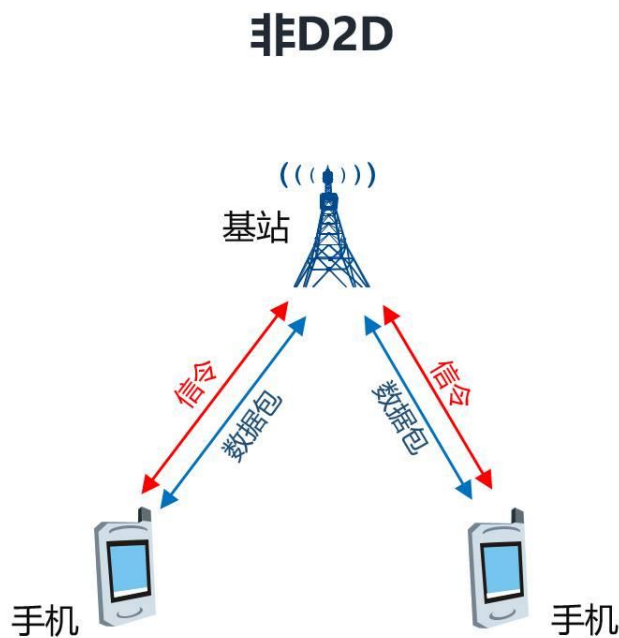
5G移动通信

- 微基站，手机天线更短
 - LTE的宏基站、微基站和微微基站
- 手机天线更短：
 - 天线长度=波长/4有关
- 大规模MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）
 - 基站布设天线阵列、波束赋形（控制射频信号的相位，使电磁波的波束指向手机）



5G移动通信

- 同一基站下的两个用户，直接通信，数据将不再通过基站转发，节省空中资源，降低基站压力





习题

- 名词术语：PCM、TDM、FDM、MODEM
- 若要在通带为 $2\text{MHz} \sim 2.1544\text{MHz}$ 的线路上，支持T1速率（ 1.544Mbps ）的数据传输。问：
 - a) 信道的信噪比必须达到多少？（提示：香侬定理）
 - b) 分析T1线路的信道利用率
（提示：信道利用率=信源数据速率/总数据速率）
 - 参考答案 a) 30dB 。 b) 87%
- 发送0111110比特序列，画出曼彻斯特码和非归零码（NRZ）的波形，分析两者的优缺点。
- 在无噪声情况下，若信道带宽为 3KHz ，采用QAM-16调制，计算该通信链路的最大数据速率。（参考答案 24Kbps ）
- OC-3的用户数据率是 148.608Mbps ，问是如何由OC-3的参数得来的？