

综合实验—数字通信 仿真实验

北京航空航天大学
电子信息工程学院

提纲

- 数字通信概述
- 数字调制技术
- 无线衰落信道
- 实验任务与要求

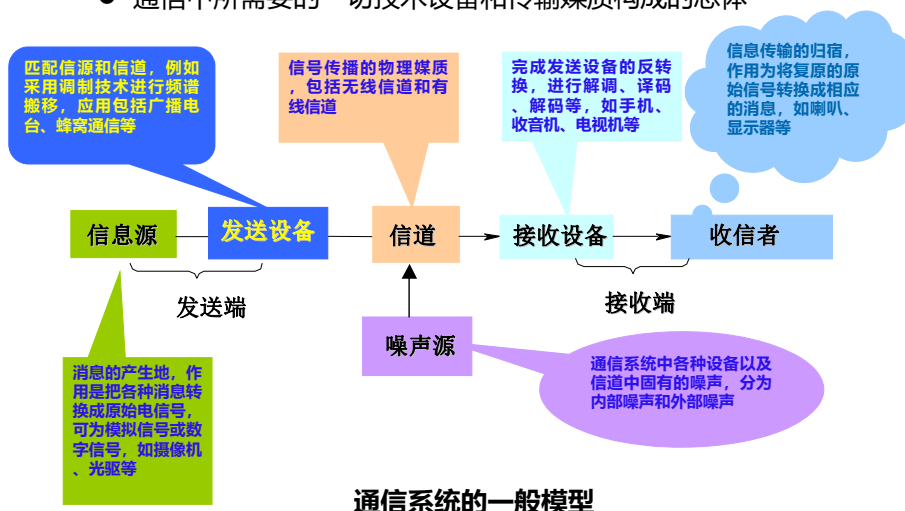
提纲

- 数字通信概述
- 数字调制技术
- 无线衰落信道
- 实验任务与要求

通信系统

□ 通信系统

- 通信中所需要的一切技术设备和传输媒质构成的总体



现代通信

- 1864: 麦克斯韦发现电磁场原理, 预测电磁波的存在

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (\text{Gauss's Law for electricity})$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Faraday's Law of induction})$$

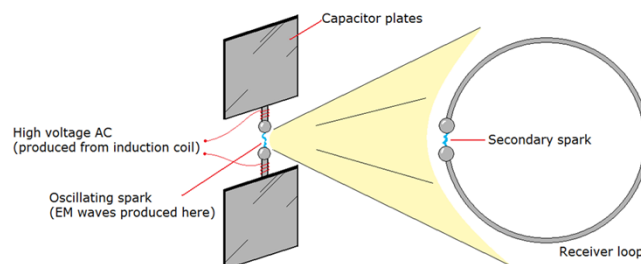
$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Gauss' law for magnetism})$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{Ampere's Law})$$



现代通信

- 1864: 麦克斯韦发现电磁场原理, 预测电磁波的存在
- 1888: 赫兹实验证实麦克斯韦关于存在电磁波的预言



现代通信

- 1864: 麦克斯韦发现电磁场原理, 预测电磁波的存在
- 1888: 赫兹实验证实麦克斯韦关于存在电磁波的预言
- 1896: 马可尼成功试验14.4公里无线电报, 取得专利
- 1901: 马可尼实现英国到加拿大横越大西洋无线连接



现代通信

- 1864: 麦克斯韦发现电磁场原理, 预测电磁波的存在
- 1888: 赫兹实验证实麦克斯韦关于存在电磁波的预言
- 1896: 马可尼成功试验14.4公里无线电报, 取得专利
- 1901: 马可尼实现英国到加拿大横越大西洋无线连接
- 1906: 费森登在美国第一次成功进行了无线广播
- 1920: 马可尼发现了短波, 实现长距离无线通信
- 1928: 英国贝尔德采用短波进行伦敦-纽约电视播放
- 无线电台用于军队、政府、大型企业进行远距离实时通信
- 更高目标——5W:
 - 让任何人(whoever)在任何地方(wherever)任何时间(whenever)可以同任何人(whomever)进行任何形式(whatever)的通信

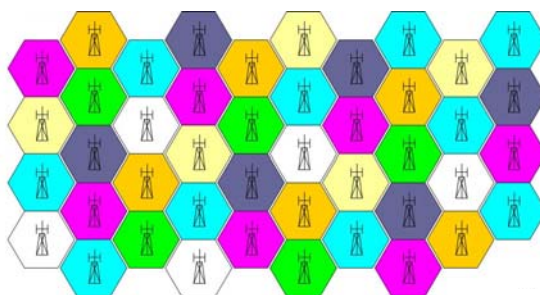
蜂窝通信

□ 1946：基于广电架构的贝尔移动系统

系统建在高塔上，用大功率发射机来获得广覆盖，最多能支持2800km²内12个同时呼叫

□ 1974：贝尔实验室提出蜂窝移动通信概念

降低发射塔的功率，缩小覆盖半径，从而使同一个频段在不同的空间得到重复利用，称之为频率复用



蜂窝通信

□ 蜂窝系统演进

第一代 1G
AMPS, NMT, TACS



第二代 2G
D-AMPS, GSM/GPRS, cdmaOne



第三代 3G
CDMA2000/EV-DO, WCDMA/HSPA+, TD-SCDMA



第四代 4G LTE
LTE, LTE Advanced



N/A

模拟语音



<0.5 Mbps

数字语音+低速数据通信



63+ Mbps

移动宽带



300+ Mbps

更快更优



1



1G建立无缝移动通信，提供移动语音业务

2



2G采用数字通信技术，提高系统语音容量，推动移动通信平民化

3



3G开启面向移动宽带数据业务的系统设计和优化

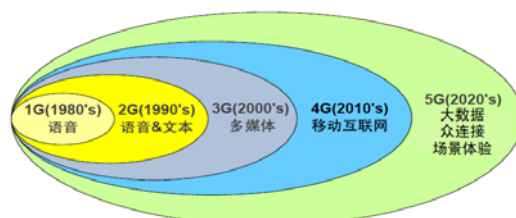
4



4G提供更高的系统容量，大幅改善移动宽带业务的用户体验

蜂窝通信

□ 第五代移动通信系统 (5G)



1G->4G:

以业务能力或某典型技术来区分

5G: 业务驱动

数据-量、密度、大数据。

连接-量、密度、物联网。

体验-随时随地、快速、可靠、低成本

中国策略：3G形成突破、4G国际同步、5G引领全球

通信系统基本概念

□ 信号、信息、信道



- **信号** – 携带信息的载体（公路上的车辆）
- **信息** – 人们对客观世界的认识，以数据为表示形式（车里的人）
- **信道** – 信号传输的通道（车道）

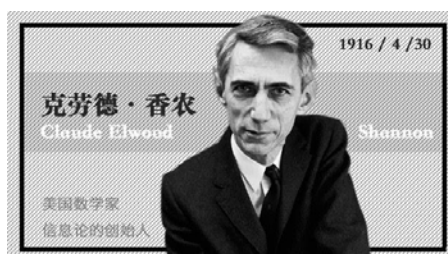
通信系统基本概念

□ 信道容量

- 表征信道传送信息的最大能力（单位时间运送的人数）
- 影响因素：
 - 信道带宽B（公路车道数）
 - 信道质量N（路面秩序和平整度）
 - 信号质量S（车况车速）
- 香农容量



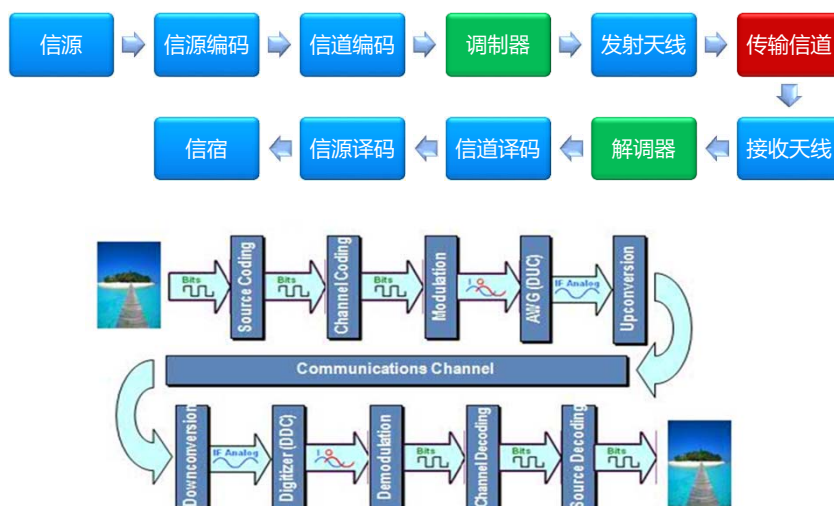
$$C = B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{B \cdot N_0}\right)$$



提纲

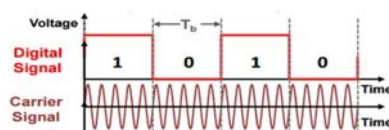
- 数字通信概述
- 数字调制技术
- 无线衰落信道
- 实验任务与要求

数字通信收发机结构



载波调制

□ 调制：将“二进制数据”由“电磁波”传输出去



□ 目的：

- 降低基带通信干扰
- 有效利用频带
- 减小天线尺寸

□ 如何让“电磁波”携带“数据”？

- 利用电磁波（也叫**载波**）的幅度、相位、频率 $A \cos(2\pi f_c t + \phi)$
 - ✓ 幅度键控 (ASK)：控制幅度
 - ✓ 相位键控 (PSK)：控制相位
 - ✓ 频率键控 (FSK)：控制频率

载波调制

□ 如何发送数据？

- 发送时长为 T 的电磁波
- 电磁波的幅度/相位/频率有 M 种选择
⇒ 在时间 T 内可传送 $\log_2 M$ 比特
- 重复上述步骤，直至传送完所有比特

此过程称为“调制”

□ 如何接收数据？

- 接收机解出收到的电磁波的幅度/相位/频率
- 判断属于 M 种选择中的哪一种

此过程称为“解调制”
或者“解调”

□ 如何从幅度/相位/频率中恢复比特数据？

- 系统事先规定好每个可选的幅度/相位/频率代表什么比特
- 例如：可规定 $M = 4$ 种幅度分别代表 00/01/11/10
- 发射机和接收机采用约定好的方式来发送和恢复比特数据

载波调制

□ 幅度键控 (ASK) : 控制幅度

□ 相位键控 (PSK) : 控制相位

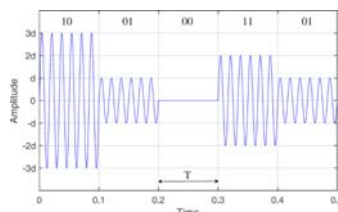
□ 频率键控 (FSK) : 控制频率

幅度键控 (ASK)

□ 如何使用载波的幅度携带信息?

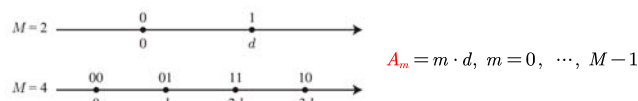
- 设定载波有 M 个幅度, 则电磁波可以携带 $\log_2 M$ 比特信息
- 发送的调制信号: $x(t) = A_m \cos(2\pi f_c t + \phi)$, $t \in [0, T]$
 T 为符号周期, A_m 有 M 种可能的取值

- 举例: $M = 4$



✓ 每段电磁波可以携带2比特, 如果要发送的比特是10, 则幅度为3d

- 星座图: 给出 M 个可选的幅度、及其比特映射关系



幅度键控 (ASK)

□ 接收信号:

- 加性白高斯信道 (AWGN, additive white Gaussian Noise)
- 接收信号: $y(t) = x(t) + n(t) = A_m \cos(2\pi f_c t + \phi) + n(t)$

其中, $n(t)$ 是功率谱密度为 $\frac{N_0}{2}$ 的白高斯随机过程

□ 解调: 如何从接收信号中恢复出发送的符号 (星座图点 A_m)

- ① 在接收端生成一个载波信号, 将其与接收信号进行相关运算:

$$z(t) = \int_0^t y(\tau) \cos(2\pi f_c \tau + \phi) d\tau = \int_0^t A_m \cos^2(2\pi f_c \tau + \phi) + n(\tau) \cos(2\pi f_c \tau + \phi) d\tau$$

- ② 在 $t = T$ 时刻对相关运算结果 $z(t)$ 进行采样, 并乘以 $\frac{2}{T}$:

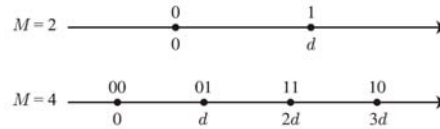
$$\frac{2}{T} z(T) = A_m + \frac{2}{T} \int_0^T n(\tau) \cos(2\pi f_c \tau + \phi) d\tau \triangleq A_m + \tilde{n}$$

不难得到: \tilde{n} 为均值为0, 方差为 $\sigma^2 = \frac{N_0}{T}$ 的高斯随机变量

- ③ 根据 $z(T)$, 判断发送的 A_m 是 M 种可能的幅度中的哪一个

幅度键控 (ASK)

□ 星座图



- 问题：星座图中 $M = 4$ 和 2 时的 d 是否相同？

✓ 假设 “0” 和 “1” 等概率出现

✓ 当 $M = 2$ 时，调制信号 $A_m \cos(2\pi f_c t + \phi)$ 的平均功率为：

$$P_{M=2} = 0.5 \times \left(0 + \frac{1}{T} \int_0^T d_{M=2}^2 \cos^2(2\pi f_c t + \phi) dt \right) \xrightarrow{f_c \gg \frac{1}{T}} \frac{1}{4} d_{M=2}^2$$

✓ 当 $M = 4$ 时，调制信号 $A_m \cos(2\pi f_c t + \phi)$ 的平均功率为：

$$P_{M=4} \approx 0.25 \times \left(0 + \frac{d_{M=4}^2}{2} + \frac{4d_{M=4}^2}{2} + \frac{9d_{M=4}^2}{2} \right) = \frac{7}{16} d_{M=4}^2$$

- 调制信号的幅度需要根据发射功率和采用的调制级数 (M) 来设计
- 规则适用于其他调制

幅度键控 (ASK)

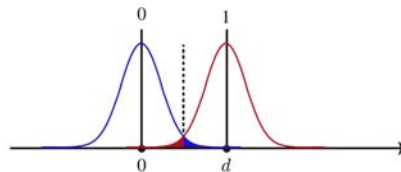
□ 星座图的距离 d 为什么重要？



- 数据传输过程中会引入噪声： $z(T) = A_m + \tilde{n}$, $\tilde{n} \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{N_0}{T}\right)$

✓ 接收信号的幅度发生偏移

✓ 假设噪声服从高斯分布，则接收信号幅度的分布为 ($M = 2$)：



✓ 传输错误：

- ✓ 如果发送 0，当接收信号的幅度处于蓝色阴影区域，则会被判为 d
- ✓ 如果发送 d ，当接收信号的幅度处于红色阴影区域，则会被判为 0

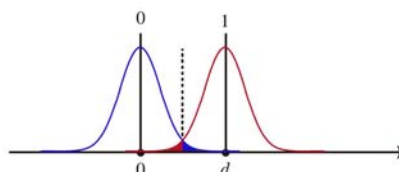
幅度键控 (ASK)

❑ 错误概率有多大 ($M = 2$) ?

● 误符号率 (Symbol Error Rate, SER) :

- ✓ 符号: 星座图上的每一个点
- ✓ 假设噪声服从高斯分布, 则 “发射的符号d而被判为符号0” 的概率为:

$$\begin{aligned}
 P_e &= \mathbb{P}\left\{y < \frac{d}{2}\right\} = \int_{-\infty}^{\frac{d}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-d)^2}{2\sigma^2}} dy \\
 &\stackrel{t=\frac{y-d}{\sigma}}{=} \int_{-\infty}^{-\frac{d}{2\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \\
 &\triangleq Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right)
 \end{aligned}$$



幅度键控 (ASK)

❑ 错误概率有多大 ($M = 2$) ?

● 误符号率 $P_e = Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right)$ 的两种表示方式:

- ✓ 信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) : 信号与噪声功率之比

$$P_e = Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{P_s}}{\sigma}\right) = Q(\sqrt{SNR}), \quad SNR = \frac{P_s}{\sigma^2}$$

$$P_{M=2} = 0.5 \times \left(0 + \frac{1}{T} \int_0^T d_{M=2}^2 \cos^2(2\pi f_c t + \phi) dt\right) \xrightarrow{t \gg \frac{1}{f_c}} \frac{1}{4} d_{M=2}^2$$

- ✓ E_s/N_0 : 符号能量

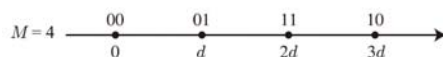
$$P_e = Q\left(\frac{\sqrt{P_s}}{\sigma}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{P_s}}{\sqrt{N_0/T}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right), \quad E_s = P_s T$$

$$z(T) = A_m + \tilde{n}, \quad \tilde{n} \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{N_0}{T}\right)$$

- ✓ $E_b = E_s / \log_2 M$: 比特能量

幅度键控 (ASK)

□ $M > 2$ 时, 错误概率有多大?



● 对于任意M, 距离d满足: $P_s = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{m^2 d^2}{2} = \frac{(M-1)(2M-1)}{12} d^2$

● 误符号率:

✓ 边缘两点: 只有一侧会出错

✓ 内部各点: 两侧都会出错

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{1}{M} \left(\mathbb{P} \left\{ y - x_L > \frac{d}{2} \right\} + \mathbb{P} \left\{ y - x_R < -\frac{d}{2} \right\} + (M-2) \mathbb{P} \left\{ |y - x| > \frac{d}{2} \right\} \right) \\
 &= \frac{2(M-1)}{M} \int_{\frac{d}{2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma} e^{-y^2/\sigma^2} dy = \frac{2(M-1)}{M} \int_{\frac{d}{\sqrt{2}\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \\
 &= \frac{2(M-1)}{M} Q \left(\frac{d}{\sqrt{2}\sigma} \right) \\
 &= \frac{2(M-1)}{M} Q \left(\sqrt{\frac{3\text{SNR}}{(M-1)(2M-1)}} \right)
 \end{aligned}$$

● 误比特率 (误码率, bit error rate, BER) : $P_b \approx \frac{1}{\log_2 M} P_e$ Why?

载波调制

□ 幅度键控 (ASK) : 控制幅度

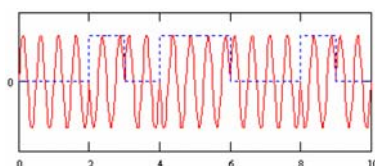
□ 相位键控 (PSK) : 控制相位

□ 频率键控 (FSK) : 控制频率

相位键控 (PSK)

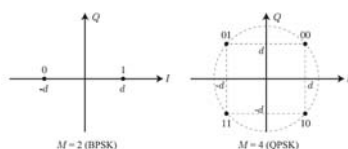
□ 如何使用载波的相位携带信息?

- 设定载波有 M 个相位, 则电磁波可以携带 $\log_2 M$ 比特信息
- 发送的调制信号: $x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_m)$, $t \in [0, T]$
 T 为符号周期, ϕ_m 有 M 种可能的取值
- 举例: $M = 2$ ($\phi_1 = 0, \phi_2 = \pi$)



✓ 每段电磁波可以携带1比特数据

- 星座图:



相位键控 (PSK)

□ 接收信号:

- 加性白高斯信道 (AWGN)
- 接收信号: $y(t) = x(t) + n(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_m) + n(t)$, $0 \leq t \leq T$

其中, $n(t)$ 是功率谱密度为 $\frac{N_0}{2}$ 的白高斯随机过程

□ 解调: 如何从接收信号中恢复出发送的符号 (星座图点 ϕ_m)

- 换一个角度来理解PSK信号: $x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_m)$, $t \in [0, T]$

$$x(t) = A \cos \phi_m \cos(2\pi f_c t) - A \sin \phi_m \sin(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T$$

- $\cos 2\pi f_c t$ 与 $\sin 2\pi f_c t$ 相互正交: $\int_0^T \cos(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_c t) dt \xrightarrow{f_c \gg 1} 0$
- PSK调制的另一种理解:
 - ✓ 同时使用 $\cos 2\pi f_c t$ 与 $\sin 2\pi f_c t$ 两个正交的载波发送数据
 - ✓ $\cos 2\pi f_c t$ 载波发送的是离散数据 $A \cos \phi_m$
 - ✓ $\sin 2\pi f_c t$ 载波发送的是离散数据 $A \sin \phi_m$

相位键控 (PSK)

□ 接收信号: $y(t) = x(t) + n(t) = A \cos \phi_m \cos(2\pi f_c t) - A \sin \phi_m \sin(2\pi f_c t) + n(t)$

□ 解调: 如何从接收信号中恢复出发送的符号 (星座图点 ϕ_m)

① 在接收端生成载波信号 $\cos 2\pi f_c t$, 将其与接收信号进行相关运算:

$$z_c(t) = \int_0^t y(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau = \int_0^t A \cos(2\pi f_c \tau + \phi_m) \cos(2\pi f_c \tau) + n(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau$$

② 在接收端生成载波信号 $\sin 2\pi f_c t$, 将其与接收信号进行相关运算:

$$z_s(t) = \int_0^t y(\tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau = \int_0^t A \cos(2\pi f_c \tau + \phi_m) \sin(2\pi f_c \tau) + n(\tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau$$

③ 在 $t = T$ 时刻对相关运算结果 $z_c(t)$ 和 $z_s(t)$ 进行采样, 并乘以 $\frac{2}{T}$:

$$\frac{2}{T} z_c(T) = A \cos \phi_m + \tilde{n}_c \quad \frac{2}{T} z_s(T) = A \sin \phi_m + \tilde{n}_s$$

\tilde{n}_c 和 \tilde{n}_s 为均值为 0, 方差为 $\sigma^2 = \frac{N_0}{T}$ 的高斯随机变量, 相互统计独立

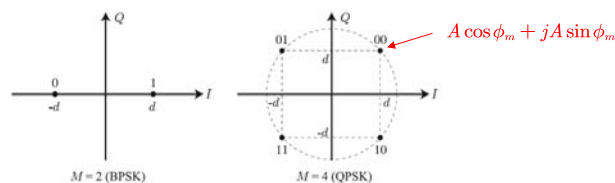
④ 根据 $\frac{2}{T} z_c(T)$ 和 $\frac{2}{T} z_s(T)$, 判断 ϕ_m 是 M 种可能的相位中的哪一个

相位键控 (PSK)

□ 解调差错概率 (高斯噪声):

□ BPSK 可以看作是带符号的 ASK 调制 (幅度为 $-d$ 和 d)

□ QPSK 可以看作是带符号的两维 ASK 调制 (实轴和虚轴)



$$P_e = \mathbb{P}\{00 \rightarrow 01\} + \mathbb{P}\{00 \rightarrow 10\} + \mathbb{P}\{00 \rightarrow 11\}$$

$$= \left(1 - Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right)\right) Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right) + \left(1 - Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right)\right) Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right) Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right)$$

虚部正确、实部错误

实部正确、虚部错误

实部错误、虚部错误

$$= 2Q\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right) - Q^2\left(\frac{\sqrt{2}d}{\sigma}\right)$$

$$= 2Q(\sqrt{2SNR}) - Q^2(\sqrt{2SNR})$$

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T A^2 \cos^2(2\pi f_c t + \phi_m) dt = \frac{A^2}{2}$$

$$d = A \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} A = \sqrt{P_s}$$

载波调制

- 幅度键控 (ASK) : 控制幅度
- 相位键控 (PSK) : 控制相位
- 频率键控 (FSK) : 控制频率

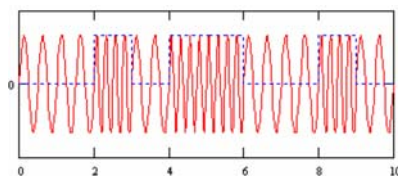
频率键控 (FSK)

□ 如何使用载波的频率携带信息?

- 设定 M 个不同频率的载波, 则电磁波可以携带 $\log_2 M$ 比特信息
- 发送的调制信号 $\hat{x}(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t)$, $t \in [0, T]$

T 为符号周期, Δf 为两个相邻载波的频率间隔

- 举例: $M = 2$



- ✓ 每段电磁波可以携带1比特数据

频率键控 (FSK)

□ 接收信号:

- 加性白高斯信道 (AWGN)
- 接收信号: $y(t) = x(t) + n(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T$

其中, $n(t)$ 是功率谱密度为 $\frac{N_0}{2}$ 的白高斯随机过程

□ 解调: 如何从接收信号中恢复出发送的符号 (识别载波频率)

- 基本要求: 各载波频率相互正交, 即满足:

$$\int_0^T \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t) \cos(2\pi f_c t + 2\pi n \Delta f t) dt = 0, \quad \forall n \neq m$$

- 可以得到:

载频间隔 Δf 应是 $\frac{1}{2T}$ 整数倍

频率键控 (FSK)

□ 接收信号: $y(t) = x(t) + n(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T$

□ 解调: 如何从接收信号中恢复出发送的符号

- ① 在接收端, 将接收信号与 M 个可能的载波进行相关运算:

$$z_k(t) = \int_0^t y(\tau) \cos(2\pi f_c \tau + 2\pi k \Delta f \tau) d\tau = \int_0^t A \cos(2\pi f_c \tau + 2\pi m \Delta f \tau) \cos(2\pi f_c \tau + 2\pi k \Delta f \tau) + n(\tau) \cos(2\pi f_c \tau + 2\pi k \Delta f \tau) d\tau$$

- ② 在 $t = T$ 时刻对相关运算结果 $z_k(t)$ 进行采样, 并乘以 $\frac{2}{T}$:

$$\frac{2}{T} z_k(T) = A \frac{\sin(2\pi(m-k)\Delta f T)}{2\pi(m-k)\Delta f T} + \tilde{n}_k = \begin{cases} A + \tilde{n}_m, & k = m \\ \tilde{n}_k, & k \neq m \end{cases}$$

- ③ 根据 $\frac{2}{T} z_k(T)$, 判断载波的频率是 M 种可能的频率中的哪一个

方法: 挑选 $\frac{2}{T} z_k(T)$ 最大值对应的载频作为输出

频率键控 (FSK)

□ FSK误码性能

- 本地相关输出信号: $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_{M-1}] = [A + \tilde{n}_0, \tilde{n}_1, \dots, \tilde{n}_{M-1}]$

- r_0 的概率密度函数: $p_{r_0}(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x_0-A)^2}{2\sigma^2}}$

- 给定 r_0 时的正确解调概率:

$$P_c = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbb{P}\{\tilde{n}_1 < r_0, \dots, \tilde{n}_{M-1} < r_0 | r_0\} p_{r_0}(r_0) dr_0$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \mathbb{P}^{M-1}\{\tilde{n}_1 < r_0 | r_0\} p_{r_0}(r_0) dr_0$$

- 误符号率 (SER) $P_e = 1 - P_c = \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} \binom{M-1}{n} \frac{1}{n+1} e^{-\frac{k}{k+1} SNR}$

- 误码率 (BER) $P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e$

相干解调与非相干解调

□ 相干解调

- 前面介绍的ASK、PSK、FSK解调方法都属于相干解调
- 要求1: 接收端生成载波
- 要求2: 将载波与接收信号进行相关, 并在T时刻采样

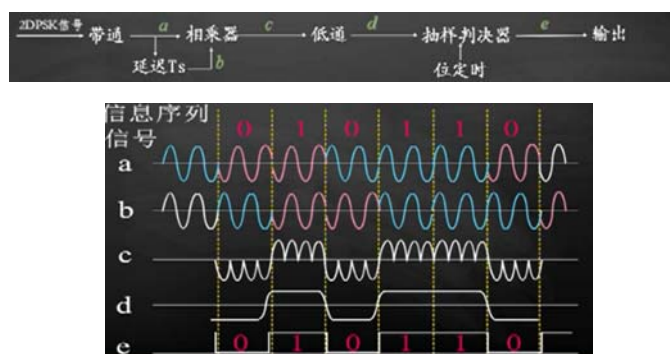
□ 非相干解调

- 对于ASK和FSK调制方式, 也可以采用非相干解调
- 接收端只使用接收信号来求解发送的符号, 无需生成载波
- PSK需要进行相干解调, 差分PSK (DPSK) 可进行非相干解调

相干解调与非相干解调

□ DPSK调制

- 使用前后两个符号的电磁波的相位差来携带比特信息
- 例如：相位差为0：比特1，相位差 π ：比特0
- 非相干解调方法：



加性白高斯噪声信道 和 衰落信道

□ AWGN信道

- 前面介绍的ASK、PSK、FSK的解调只考虑AWGN信道
- 特征1：信号没有衰落，或信道为单位冲击响应
- 特征2：噪声为高斯白噪声

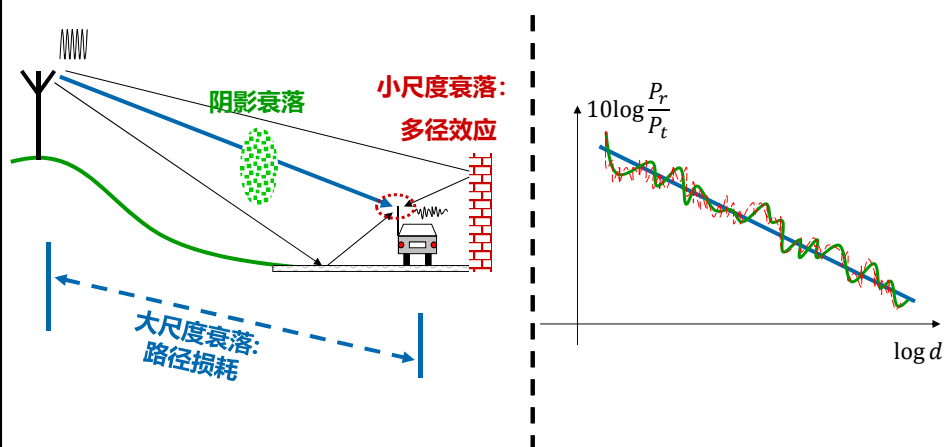
□ 衰落信道

- 实际系统中，信号在传播过程中会发生幅度衰落和相位改变
- 为了正确解调数据，需要恢复衰落信道对信号的影响

提纲

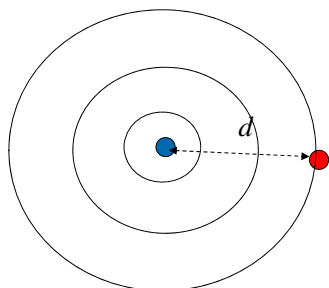
- 数字通信概述
- 数字调制技术
- 无线衰落信道
- 实验任务与要求

无线衰落



大尺度信道

□ 路径损耗



全向天线接收功率:

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

路径损耗:

$$L = 20 \log f_c + 20 \log d + 32.45$$

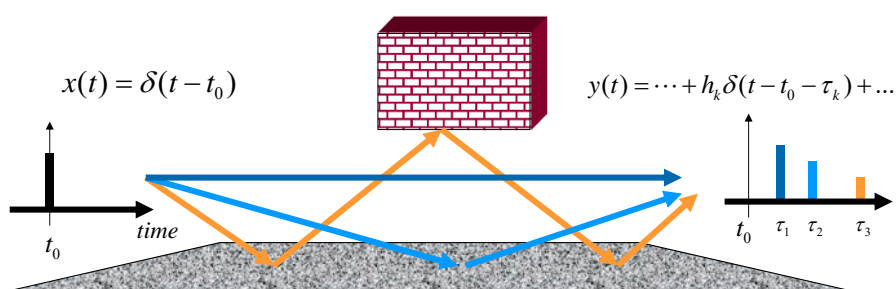
f_c : 载波频率 (MHz)

d : 通信距离 (km)

□ 阴影衰落

- 来自建筑物、自然环境的遮挡
- 通常服从对数正态分布

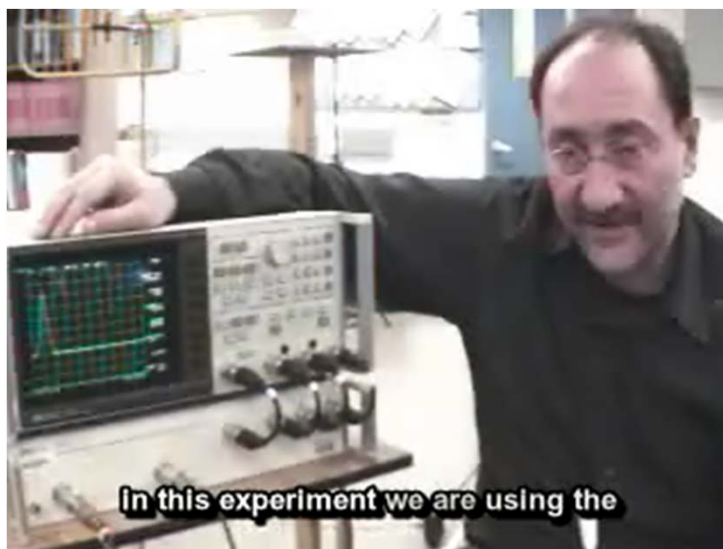
小尺度信道



□ 多径时延

- 100米路径差导致: 0.33微秒时延
- 室内: 10~50纳秒
- 郊区: 0.2~2微秒
- 城区: 1~3微秒
- 山区: 3~10微秒

无线信道



衰落信道下的接收信号

- ASK和PSK调制信号: $x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi)$
- 经过衰落信道后的接收信号: $y(t) = aA \cos(2\pi f_c t + \phi + \theta)$
 a : 幅度衰落 θ : 相位改变
- 接收信号的复数表示:

$$y(t) = \Re \{ \underset{\substack{\uparrow \\ \text{实部}}}{ae^{j\theta}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{信道}}}{A} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{基带调} \\ \text{制信号}}}{e^{j\phi}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{载波}}}{e^{j2\pi f_c t}} \}$$

□ 信道统计模型: 瑞利模型

- 特征1: 信道 $h = ae^{j\theta}$ 服从循环对称复高斯分布, 实部和虚部为统计独立高斯分布 $N(0, \frac{1}{2})$
- 特征2: 幅度 $|h|$ 服从瑞利分布, $|h|^2$ 服从指数分布
- 特征3: 相位 $\angle h$ 服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布

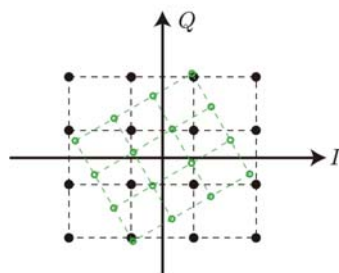
衰落信道下的解调

□ 衰落信道影响

- 衰落信道会导致星座图的缩放和旋转：

$$y(t) = \Re\{ae^{j\theta} Ae^{j\phi} e^{j2\pi f_c t}\}$$

- 把发送的 $Ae^{j\phi}$ 星座点误认为 $aAe^{j(\phi+\theta)}$ ，导致解调错误



衰落信道下的解调

□ 衰落信道影响——以PSK调制为例

$$y(t) = \Re\{ae^{j\theta} Ae^{j\phi} e^{j2\pi f_c t}\}$$

- 接收信号（忽略噪声）：

$$y(t) = x(t) + n(t) = aA \cos \phi_m \cos(2\pi f_c t + \theta) - aA \sin \phi_m \sin(2\pi f_c t + \theta)$$

- 解调：

- ① 在接收端生成载波信号 $\cos 2\pi f_c t$ ，将其与接收信号进行相关运算：

$$z_c(t) = \int_0^t y(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau = \int_0^t aA \cos(2\pi f_c \tau + \phi_m + \theta) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau$$

- ② 在接收端生成载波信号 $\sin 2\pi f_c t$ ，将其与接收信号进行相关运算：

$$z_s(t) = \int_0^t y(\tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau = \int_0^t aA \cos(2\pi f_c \tau + \phi_m + \theta) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau$$

- ③ 在 $t = T$ 时刻对相关运算结果 $z_c(t)$ 和 $z_s(t)$ 进行采样，并乘以 $\frac{2}{T}$ ：

$$\frac{2}{T} z_c(T) = aA \cos(\phi_m + \theta) \quad \frac{2}{T} z_s(T) = aA \sin(\phi_m + \theta)$$

⇒ θ 干扰对 ϕ_m 值的判断

衰落信道下的解调

□ 衰落信道影响——以PSK调制为例

$$y(t) = \Re\{ae^{j\theta} Ae^{j\phi} e^{j2\pi f_c t}\}$$

● 如何消除信道的的影响——信道均衡

- ① 在接收端生成载波信号 $\cos 2\pi f_c t$ ，将其与接收信号进行相关运算：

$$z_c(t) = \int_0^t y(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau = \int_0^t aA \cos(2\pi f_c \tau + \phi_m + \theta) \cos(2\pi f_c \tau) d\tau$$

- ② 在接收端生成载波信号 $\sin 2\pi f_c t$ ，将其与接收信号进行相关运算：

$$z_s(t) = \int_0^t y(\tau) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau = \int_0^t aA \cos(2\pi f_c \tau + \phi_m + \theta) \sin(2\pi f_c \tau) d\tau$$

- ③ 在 $t = T$ 时刻对相关运算结果 $z_c(t)$ 和 $z_s(t)$ 进行采样，并乘以 $\frac{2}{T}$ ：

$$\frac{2}{T} z_c(T) = aA \cos(\phi_m + \theta) \quad \frac{2}{T} z_s(T) = aA \sin(\phi_m + \theta)$$

- ④ 构造复信号： $z(T) = \frac{2}{T} z_c(T) + j \frac{2}{T} z_s(T) = aA e^{j(\phi_m + \theta)}$

- ⑤ 均衡信道： $\frac{z(T)}{h} = \frac{aA e^{j(\phi_m + \theta)}}{a e^{j\theta}} = A e^{j\phi_m}$ ，进而判断 ϕ_m

⇨ 消除 θ 对 ϕ_m 的干扰

衰落信道下的解调性能

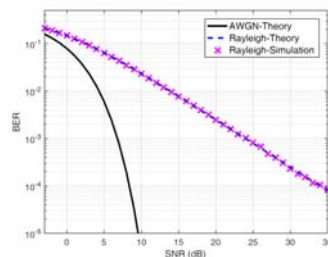
□ 解调

- 给定信道时的误符号率：

$$P_{e|h}(|h|^2) = 1 - \left(1 - 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3\gamma}{M-1}} |h|^2\right)\right)^2$$

- 信道平均后的误符号率：

$$P_e = \mathbb{E}_h\{P_{e|h}(|h|^2)\} = \int_0^\infty P_{e|h}(z) p_{|h|^2}(z) dz$$



提纲

- 数字通信概述
- 数字调制技术
- 无线衰落信道
- 实验任务与要求

仿真实验

- 通信系统的性能度量
- 通信系统仿真注意事项
- 仿真任务及要求

仿真实验

- 通信系统的性能度量
- 通信系统仿真注意事项
- 仿真任务及要求

通信系统的性能度量

- 通信系统的主要性能指标：有效性、可靠性
 - 有效性
 - 在给定信道内所传输的信息内容的多少，即传输的“速度”
 - 可靠性
 - 接收信息的准确程度，即传输的“质量”
- 数字通信系统
 - 有效性：用传输速率来衡量
 - 符号传输速率
 - 信息比特传输速率
 - 可靠性：用差错率来衡量
 - 误符号率（符号差错率）
 - 误码率（信息比特差错率）

传输速率

□ 符号传输速率 R_B ：

- 单位时间内传输符号的数目，单位是波特（Baud）
- 例：若1秒内传2400个符号，则符号传输速率为2400B
- 数字信号有多进制和二进制之分，但符号速率与进制数无关，只与传输的符号长度 T 有关

$$R_B = \frac{1}{T} (B)$$

- M进制符号速率 R_{BM} 与二进制符号速率 R_{B2} 的关系：

$$R_{B2} = R_{BM} \log_2 M (B)$$

传输速率

□ 信息比特传输速率 R_b （比特率）：

- 单位时间内传递的平均信息量或比特数，单位是比特/秒，记为bit/s、b/s或bps
- 符号速率和信息速率的关系：

$$R_b = R_B \log_2 M (b/s)$$

□ 频带利用率 η ：

- 衡量数字通信系统传输效率的核心参数：单位频带内的传输速率

$$\eta = \frac{R_B}{W} (B/s/Hz) \text{ 或 } \eta = \frac{R_b}{W} (b/s/Hz)$$

差错率

□ 误符号率（符号差错率） P_e ：

- 符号在传输系统中被传错的概率：

$$P_e = \frac{\text{错误符号数}}{\text{传输总符号数}}$$

□ 误比特率（信息差错率） P_b ：

- 发生差错的比特数在传输总比特数中所占的比例：

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

仿真实验

□ 通信系统的性能度量

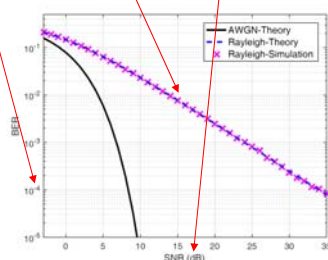
□ 通信系统仿真注意事项

□ 仿真任务及要求

仿真注意事项

□ BER ~ SNR曲线:

- 仿真任务要求画出多种调制方式的BER ~ SNR曲线
- 要求1: 横轴为SNR, 单位为dB, $SNR(dB) = 10 \log_{10} SNR$
- 要求2: 纵轴为BER, 采用以10为底的对数坐标, 需要准确画到 10^{-4}
- 要求3: 曲线要求平滑 (两个条件: 1. SNR的取值间隔不能太大, 2. 仿真数据要足够多, 至少发送 10^6 比特才能保证 10^{-4} 处的BER曲线可信)
- 举例:



仿真注意事项

□ AWGN信道和衰落信道下的曲线怎么画:

- AWGN信道: 对于任一选定的SNR, 发送至少 10^6 调制信号, 解调后计算差错率
- 衰落信道:
 - 需要对随机衰落信道的影响进行平均

```
for snr = ..... % 信噪比循环
    for mt = ..... % 蒙特卡洛循环
        随机生成二进制数据并调制;
        随机生成衰落或AWGN信道;
        根据信噪比, 随机生成AWGN;
        解调并统计差错符号或比特;
    end
end
统计误符号率或误码率并画图
```

AWGN信道下进行1次循环
衰落信道下进行至少100次循环

仿真实验

- 通信系统的性能度量
- 通信系统仿真注意事项
- 仿真任务及要求

任务一

- 使用Matlab编写脚本程序对通信系统的典型数字调制技术进行蒙特卡洛仿真（不使用Simulink），其中仿真任务≤18分，总结报告7分

- ASK调制（6分）

对ASK调制的误码性能进行仿真分析，符号间隔 $T = 1\text{s}$ ，载频 $f_c = 40/T$ 。

具体步骤如下：

1. 生成二进制基带数据
2. 分别考虑 2 ASK、4 ASK调制，将比特映射为调制符号，画出星座图
3. 对基带符号进行载波调制，画出调制信号的波形
4. 在AWGN信道，画出基带接收信号（相关采样之后）的星座图
5. 进行信号解调，统计不同信噪比下的误符号率和误码率，画出SER~SNR和BER~SNR仿真曲线，并与理论结果进行对比验证
6. 在瑞利衰落信道下，观察接收信号在信道均衡前后的星座图
7. 进行信号解调，统计不同信噪比下的误符号率和误码率，画出SER~SNR和BER~SNR仿真曲线，并与理论结果进行对比验证

任务二

□ PSK调制 (6分)

对PSK调制的误码性能进行仿真分析，符号间隔 $T = 1\text{s}$ ，载频 $f_c = 40/T$ 。

具体步骤如下：

1. 生成二进制基带数据
2. 分别考虑BPSK、QPSK调制，将比特映射为调制符号，画出星座图
3. 对基带符号进行载波调制，画出调制信号的波形
4. 在AWGN信道，画出基带接收信号（相关采样之后）的星座图
5. 进行信号解调，统计不同信噪比下的误符号率和误码率，画出SER~SNR和BER~SNR仿真曲线，并与理论结果进行对比验证
6. 在瑞利衰落信道下，观察接收信号在信道均衡前后的星座图
7. 进行信号解调，统计不同信噪比下的误符号率和误码率，画出SER~SNR和BER~SNR仿真曲线，并与理论结果进行对比验证

任务三

□ FSK调制 (6分)

对2FSK调制的误码性能进行仿真分析，符号间隔 $T = 1\text{s}$ ，两个载波频率分别为 $f_1 = \frac{40}{T}$ 和 $f_2 = f_1 + \frac{1}{T}$ ，信道传输时延导致的相移 $\phi = \frac{\pi}{4}$ 。

具体步骤为：

1. 生成二进制基带数据
2. 进行2FSK调制，生成2FSK调制信号
3. 经过AWGN信道，生成接收信号
4. 假设接收机已知相移 ϕ ，对FSK信号进行解调，统计不同信噪比下的误码率，画出BER~SNR仿真曲线，并与理论结果进行对比验证
5. 附加题：假设接收机未知相移 ϕ ，尝试解调FSK信号，画出BER~SNR仿真曲线。

扩展任务

□ OFDM

建立OFDM系统，考虑QPSK和16-QAM调制，仿真频率选择性信道下的误码率性能。系统带宽为 $W = 20$ MHz，子载波数为1024，循环前缀为OFDM符号周期的 $\frac{1}{4}$ 。具体步骤如下：

- 1) 搭建OFDM系统发射机
- 2) 生成频率选择性信道，设多径条数为 L ，第 l 条多径信道服从 $\mathcal{CN}(0, \frac{1}{L})$ ，时延为 $\frac{l-1}{W}$
- 3) 对OFDM接收信号进行频域均衡
- 4) 考虑不同多径长度 L ，给定 $\text{SNR} = 20$ dB，仿真误码率随多径长度 L 的变化曲线，分析多径长度与循环前缀长度的关系对误码率性能的影响
- 5) 给定多径长度 $L = 6$ ，仿真 $\text{BER} \sim \text{SNR}$ 曲线

总结报告（7分）

- 1) 报告采用word编写
- 2) 报告简要描述所选题目涉及的关键技术的基本原理
- 3) 按照实验任务组织章节，做到标题清晰，结构合理；分析和仿真结果加在相应的实验任务下
- 4) 除了实验任务中给出的仿真内容，可针对自己的兴趣或疑问开展其他相关研究，例如相同比特速率下不同调制方式之间的性能关系、对抗衰落信道的分集传输机制等等
- 5) 报告包括完成本实验的心得以及对本实验的建议
- 6) 仿真程序（m文件）需要按照任务单独建立文件夹保存，为每一个程序认真添加注释，每个文件夹内包含一个程序说明文档

加减分项

加减分项		
1	除了实验任务中给出的仿真内容，可针对自己的兴趣或疑问开展其他相关研究	依完成度加1~2分
2	程序和说明文档撰写不规范	依情况扣1~5分
3	完成扩展任务：OFDM系统	依完成度加0~6分
4	使用Matlab GUI界面进行结果展示	依完成度加1~2分

参考文献

- [1] 曹志刚，钱亚生. 现代通信原理，清华大学出版社，2012.
- [2] John G. Proakis, Masoud Salehi. Digital Communications, McGraw-Hill Education, 2007.
- [3] Richard van Nee, Ramjee Prasad. OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 1999.

补充材料

- ❑ 正交幅度调制 (QAM)
- ❑ 正交频分复用 (OFDM)
- ❑ 通信系统帧结构

补充材料

- ❑ 正交幅度调制 (QAM)
- ❑ 正交频分复用 (OFDM)
- ❑ 通信系统帧结构

正交幅度调制—QAM

□ 联合控制幅度 A 、相位 θ

$$s(t) = \Re\{x e^{j2\pi f_c t}\} = \Re\{A e^{j\theta} e^{j2\pi f_c t}\}$$

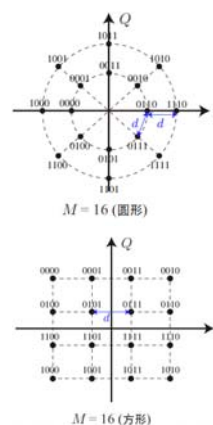
□ 星座图

- 幅度和相位：

$$A[n] \in \mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_{M_1}\}, \quad \theta[n] \in \left\{ \frac{m\pi}{M} \right\}_{m=0}^{M_2-1}$$

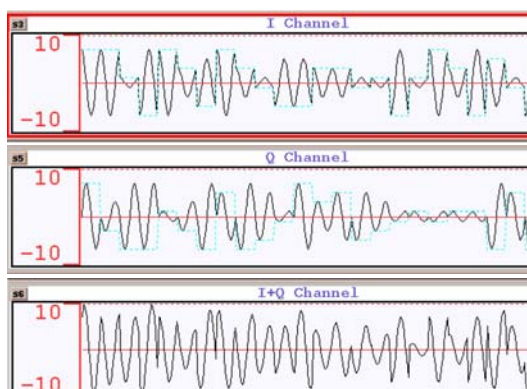
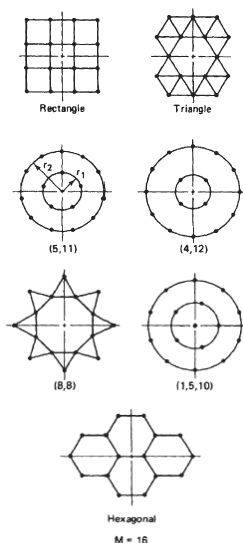
- 实部和虚部：

$$x^I[n] \in \left\{ \frac{2m-1-M_1}{2} d \right\}_{m=1}^{M_1}, \quad x^Q[n] \in \left\{ \frac{2m-1-M_2}{2} d \right\}_{m=1}^{M_2}$$



正交幅度调制—QAM

□ 星座图



正交幅度调制—QAM

□ QAM解调

- 对实部和虚部分别解调，类似ASK

$$P_{e1} = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\frac{d}{\sqrt{2}\sigma} \right)$$

- 星座图间距: $\frac{P_s}{2} = \frac{M-1}{12} d^2$

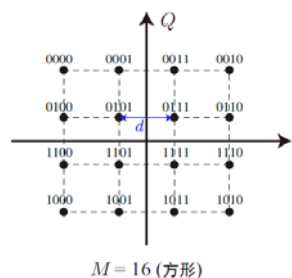
$$P_{e1} = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3}{M-1}} \text{SNR} \right)$$

- 实部和虚部同时正确的概率:

$$P_c = (1 - P_{e1})^2$$

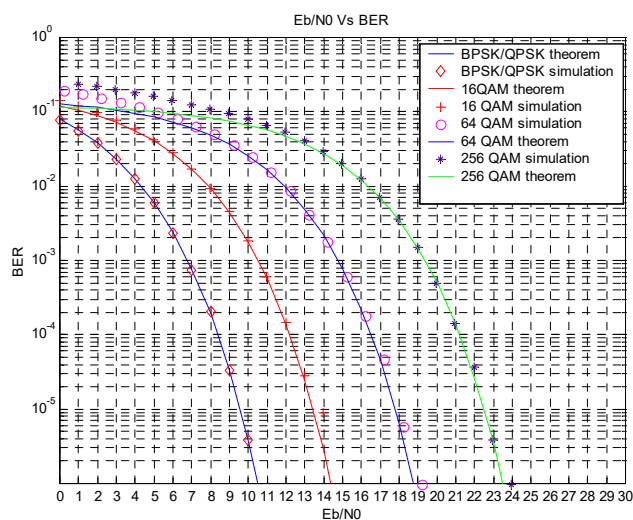
- QAM误符号率:

$$P_e = 1 - P_c = 1 - (1 - P_{e1})^2$$



正交幅度调制—QAM

□ 误码性能



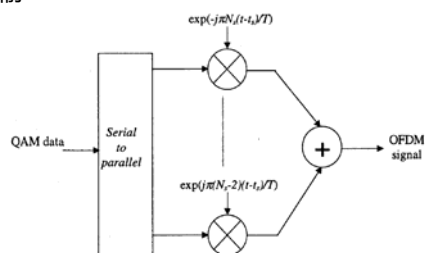
补充材料

- 正交幅度调制 (QAM)
- 正交频分复用 (OFDM)
- 通信系统帧结构

正交频分复用 (OFDM)

□ 基本原理

- 多载波传输



- 子载波正交性

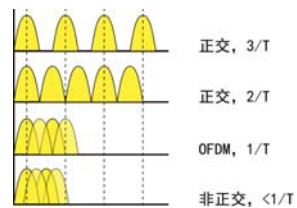
$$\gamma_{12} = \int_0^T e^{i2\pi f_1 t} (e^{i2\pi f_2 t})^* dt = \int_0^T e^{i2\pi (f_1 - f_2) t} dt = \frac{\sin(\pi \Delta f T)}{\pi \Delta f} e^{i\pi \Delta f T}$$

载频间隔: $\frac{1}{T}$ 整数倍

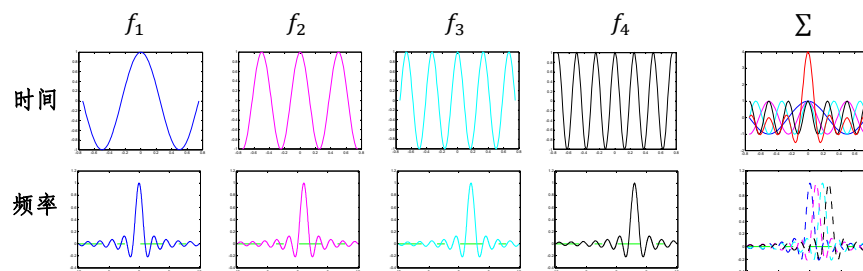
正交频分复用 (OFDM)

□ 基本原理

● 正交子载波



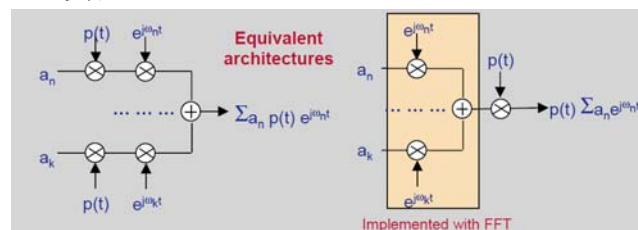
● 波形与频谱



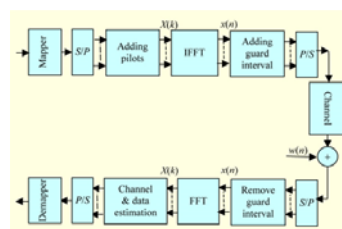
正交频分复用 (OFDM)

□ 基本原理

● IFFT实现OFDM



● 收发机结构



正交频分复用 (OFDM)

□ 符号间干扰

- 多径信道导致符号间相互干扰



- 循环前缀:

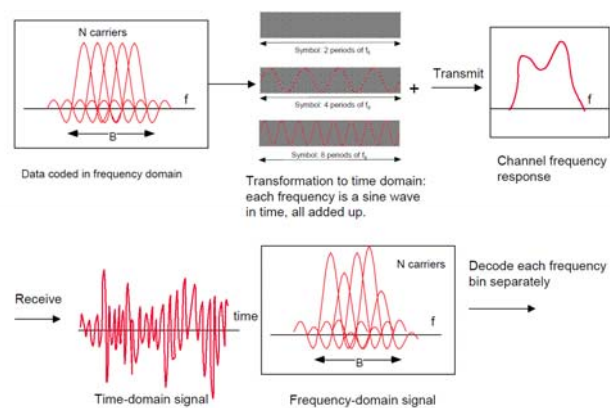


循环前缀: 将信道的线性卷积运算转变为圆卷积运算

正交频分复用 (OFDM)

□ OFDM频域均衡

- 离散基带接收信号: $y[n] = h[n] \odot x[n] + z[n]$
- 频域均衡: $Y[i] = H[i]X[i] + Z[i]$



补充材料

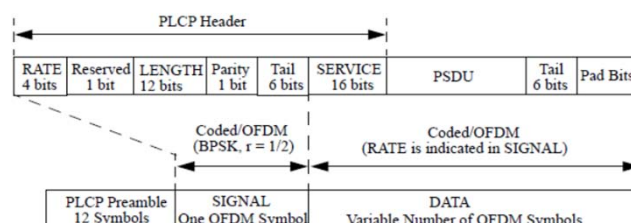
- 正交幅度调制 (QAM)
- 正交频分复用 (OFDM)
- 通信系统帧结构

基于OFDM的通信系统举例：Wi-Fi

□ Wi-Fi 802.11a标准

● 物理层数据帧的组成部分：

- 前导 (Preamble)：用于确定数据包的到达和OFDM符号的边界，也用于衰落信道估计、频率同步、频偏估计等
- 信令 (Signal)：在Preamble之后发送，用于传输信令数据，例如之后传输的数据包大小、传输速率（调制编码方式）等信息
- 数据 (Data)：发送的有效数据



基于OFDM的通信系统举例：Wi-Fi

□ Wi-Fi 802.11a标准

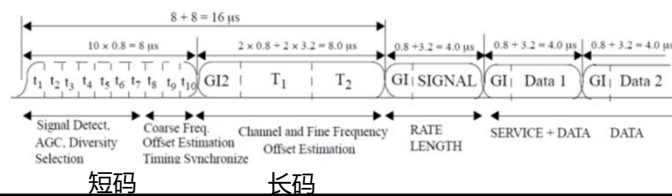
● 前导 (Preamble) :

➢ 接收端确定数据何时达到的方法:

- 检测接收信号的电平值，当信号增强超过热噪声时可认为信号开始传输。该方法计算简单，但可靠性不高。
- 11a协议采用发送一组确定信号（称为短码）的方式进行帧检测：即发射端重复发送多次短码（长度为16），接收端对接收信号和它的延迟进行相关，当出现相关峰值时可认为数据到达。

➢ 接收端确定OFDM符号的边界:

- 在确定数据到达之后，为了确定数据包开始的边界，发送端在短码之后发送2组长码（收发端均已知，长度为64），接收机对长码与接收信号进行滑动相关，当出现两个相关峰值时即可得到OFDM符号的起始位置。



再 见!