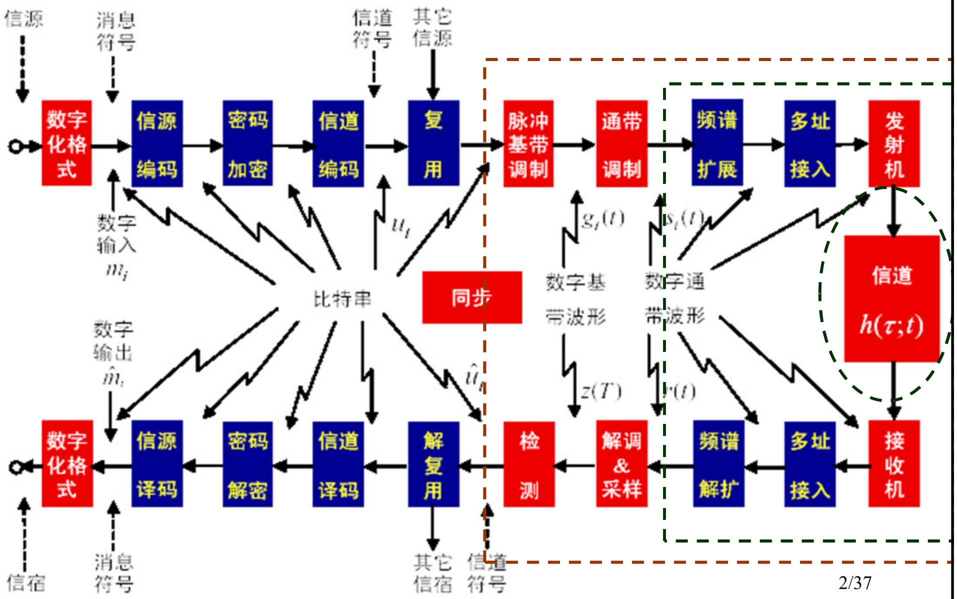
通信原理（甲）

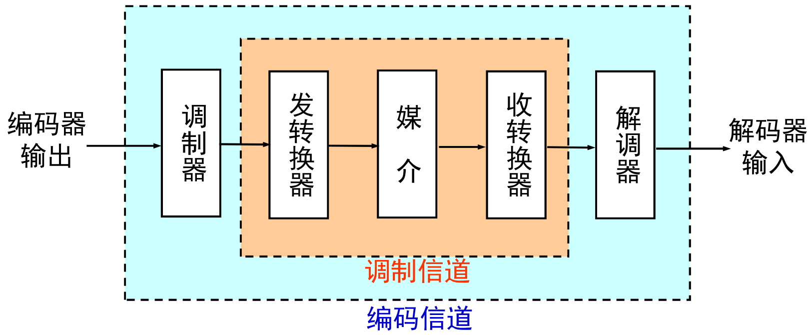
第3章 通信信道 (1)

第三章 通信信道



§ 3. 1　通信信道的定义和数学模型

一、通信信道的定义



二、信道模型

1、调制信道模型

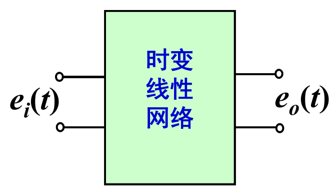
共性
① 有一对（或多对）输入，有一对（多对）输出；
② 许多信道是线性的，满足迭加原理；
③ 信号通过信道有时间迟延，受到（固定或时变）损耗；
④ 受到加性噪声影响；

单输入、单输出线性信道，

$$e_o(t) = f\left[e_i(t)\right] + n(t)$$

如　$e_o(t) = V_1(t) \cdot e_i(t) + n(t)$

或　$e_o(t) = h(\tau;t) \otimes e_i(t) + n(t)$

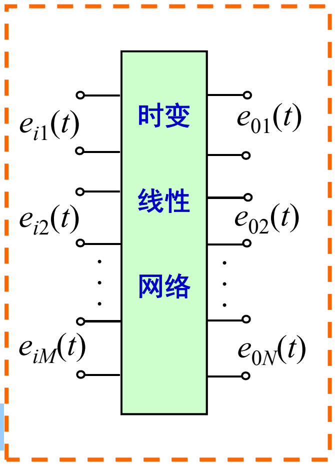


多输入、多输出线性信道

$$e_{ol}(t) = f_l\left[e_{i1}(t), e_{i2}(t), \cdots, e_{iM}(t)\right] + n_l(t)$$
$$l = 1, 2, \cdots, N$$

如 $e_{ol}(t) = \sum_{k=1}^{M} a_{k,l}(t) e_{ik}(t) + n_l(t),$
$$l = 1, 2, \cdots, N$$

或 $e_{ol}(t) = \sum_{k=1}^{M} h_{k,l}(\tau; t) \otimes e_{ik}(t) + n_l(t),$
$$l = 1, 2, \cdots, N$$



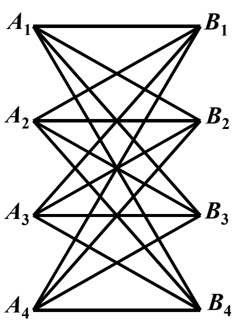
加性噪声

$e_0(t)=k(t)e_i(t)+n(t)$

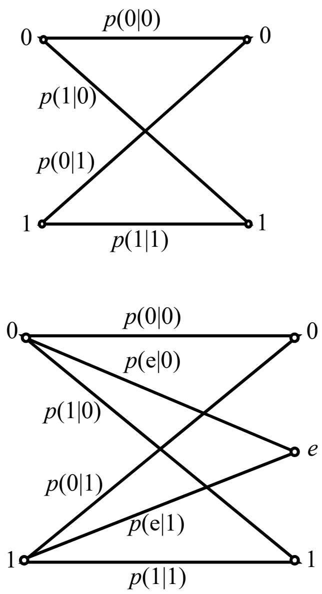
乘性干扰

5/37

2、编码信道模型

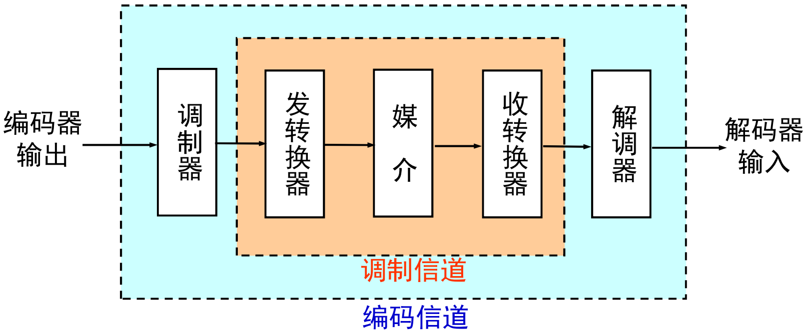


符号转移概率



6/37

编码信道与调制信道间的关系



- 调制信道是编码信道的一部分
- 编码信道的性能很大程度上是由调制信道决定

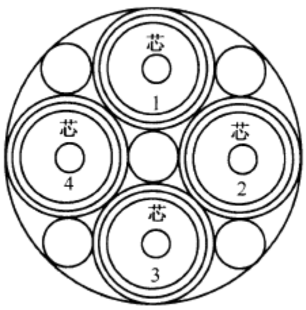
§3.2 恒参信道及其特征

$e_0(t)=k(t)e_i(t)+n(t)$

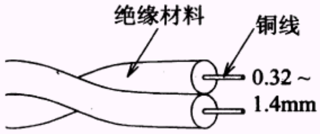
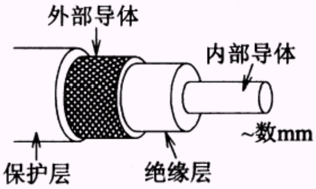
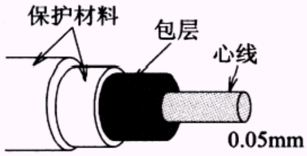
信道参数在通信过程中基本不随时间变化的信道称为恒参信道。

① 有线信道：

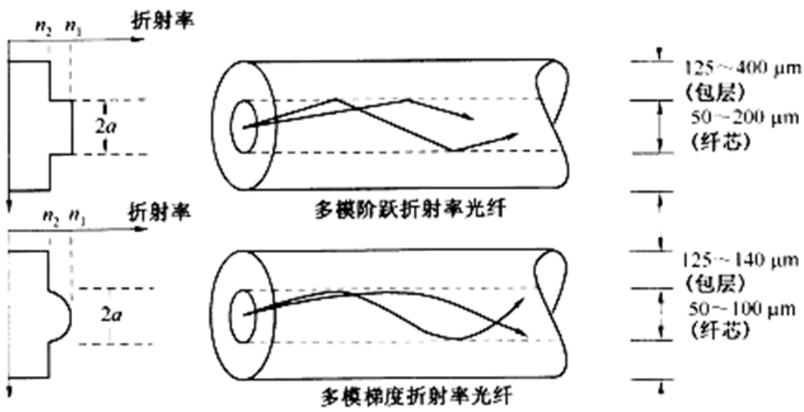
如明线，对称电缆，同轴电缆，光纤信道。



同轴电缆

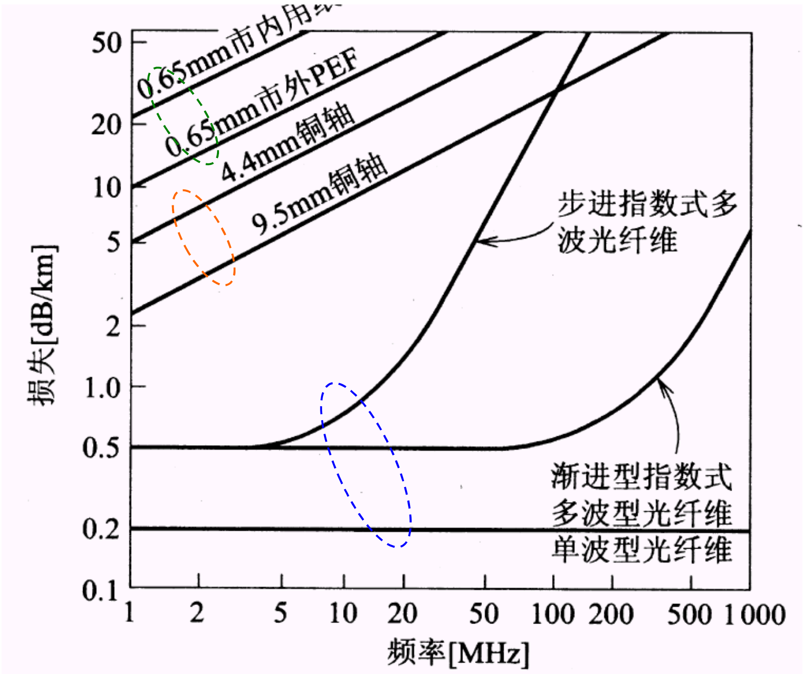
双绞线		便宜，构造简单 传送频带宽 有漏话现象 容易混入杂音	声音频率 信号传输 用户线 低速 LAN
同轴电缆		价格稍高 传送频带宽 漏话感应少 分支，接头容易	CATV 分配电缆 高速 LAN
光纤		低损失 频带宽 重量轻，直径小 无感应，无漏话	长距离大容量传输 国际间 国内城市间 高速 LAN

9/37



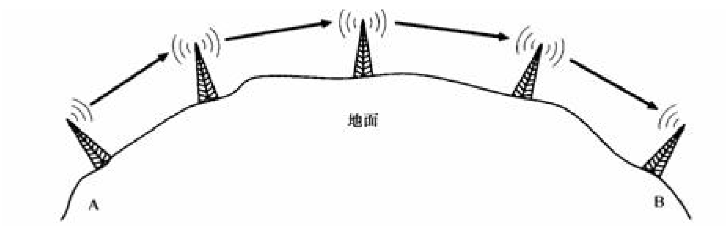
多模光纤

10/37

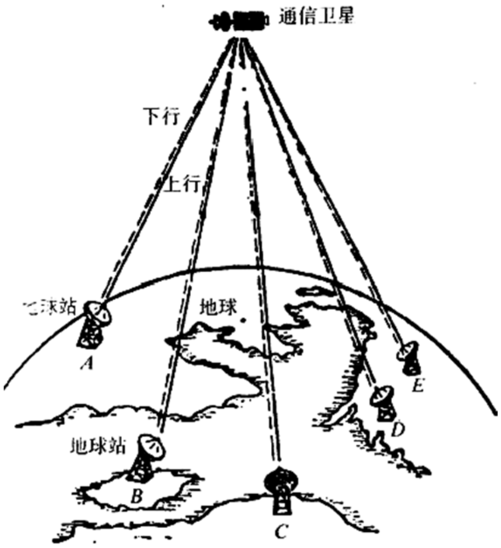


② 无线信道：

如微波视距通信，卫星中继通信。



微波视距中继通信

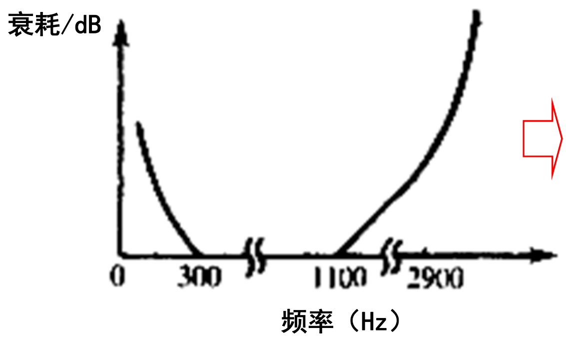


卫星通信

13/37

恒参信道对信号传输的影响：

① 幅度—频率畸变$h(f)$；



通频带太窄或带内衰减不均匀

幅度随频率发生畸变，引起信号波形失真

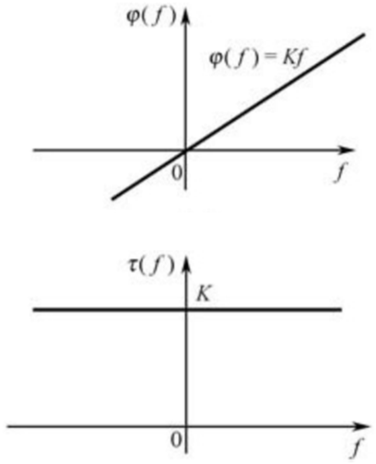
码间干扰

恒参信道（音频电话信道）的幅频特性

滤波器
混合线圈
串联电容
分路电感

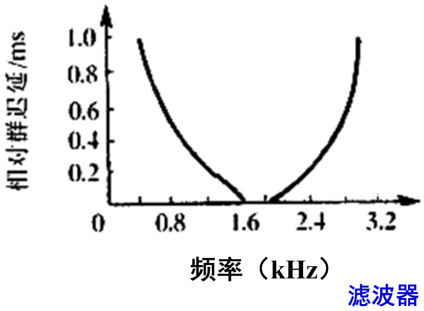
14/37

② 相位—频率畸变 $\varphi(f)$

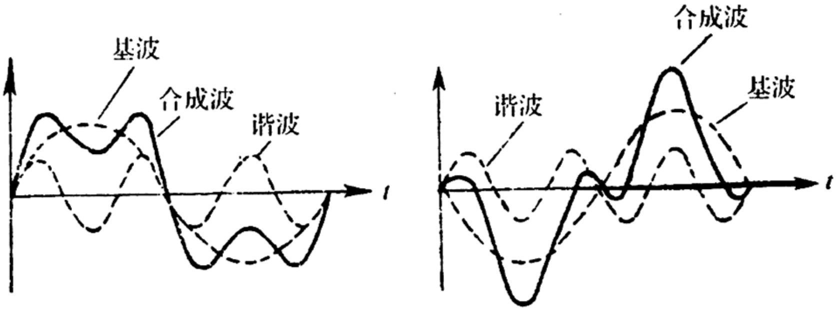


$\tau(f) = 常数 \Rightarrow \varphi(f) = k \cdot f$

- 用群延时频率特性 $\tau(f) = \dfrac{d\varphi(f)}{df}$ 表示相位畸变
- 理想群时延特性为常数



滤波器
加感线圈



群延时引起的传输失真

无失真传输条件(补充)

理想无失真传输的输出信号： $y(t)=Kx(t-t_0)$ ， K和t_0是常数

对左右两边进行傅利叶变换： $Y(f)=KX(f)e^{-j2\pi f t_0}$

得到无失真传输系统的传递函数：

$$H(f)=Y(f)/X(f)=Ke^{-j2\pi f t_0}$$

因此要获得理想的无失真传输，幅频响应应该是常数，相频响应应是频率的线性函数。但若要所有频率分量进行相等的放大或衰减，信号的所有频率分量还必须以相同的时延到达。

时延t_0与相移 θ、角频率 $\omega=2\pi f$ 的关系为： $t_0=\dfrac{\theta(\mathrm{rad})}{2\pi f(\mathrm{rad/s})}$

为了实现所有频率分量以相同的时延到达，相移要和频率成正比。常用衡量信号时延特性的指标是群延迟特性，定义为：

$$\tau(f)=\frac{1}{2\pi}\frac{d\theta}{df}$$

所以若要无失真传输，相频响应是频率的线性函数等效为群延迟$\tau(f)$为常数

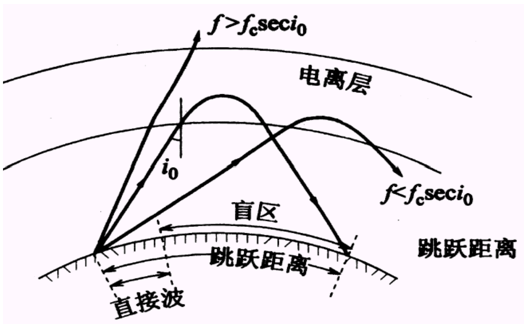
17/37

§3.3　随参信道及其特征

$e_0(t)=k(t)e_i(t)+n(t)$

随参信道的信道参数是随时随机变化的。

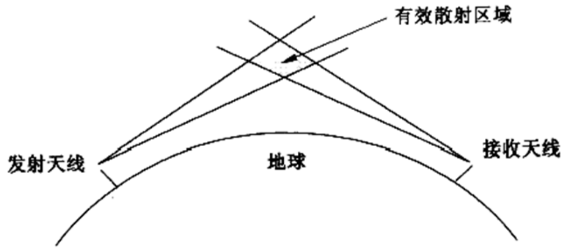
① 短波电离层反射信道；



- 长距离通信
- 短波载频3M~30MHz
- 天线尺寸要求很大
- 短波的电离层：
  50Km~1000Km
- 短波存在盲区
- 对发射角有要求

18/37

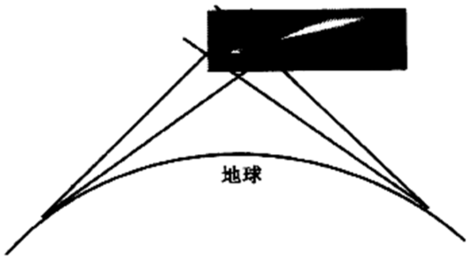
② 散射信道



•对流层离地面10~12km

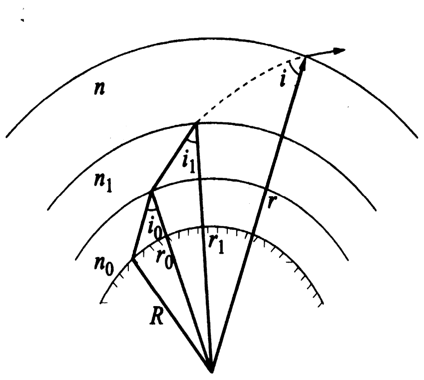
•由于对流层大气湍流运动造成气体不均匀，引起电磁波散射

对流层散射信道

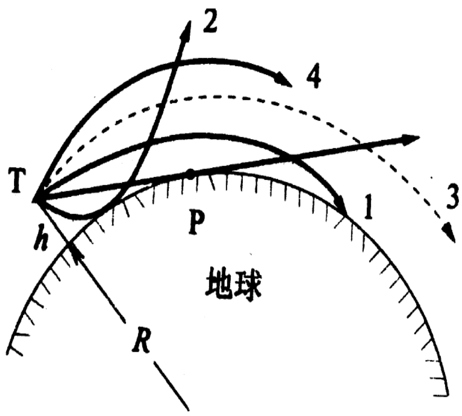


流星余迹散射信道

电波在对流层的传播

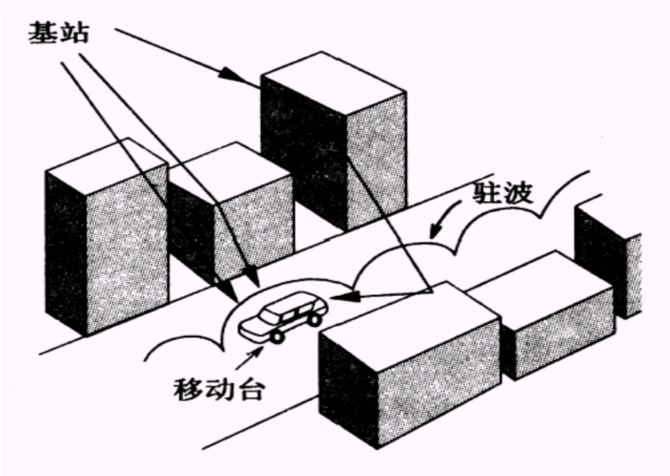


大气的折射



对流层传播例

③ 移动通信信道；



21/37

无线信号通过移动信道时会受到各方面的衰减损失和时延，接收信号的功率可以表示为

$$P(d) \sim |d|^{-n} \cdot m(d) \cdot r_0(d)$$

1、自由空间的路径损失 $|d|^{-n}$ ，n 称为路径损耗指数，一般取值在2到4之间；（大尺度）

2、阴影衰落 $m(d)$，由传输环境中的地形起伏，建筑物和其它障碍物对于电波的阻挡或屏蔽所引起的衰落，一般情况下它的对数值服从正态分布，即它服从对数正态分布；（中尺度）

3、多径衰落 $r_0(d)$，由移动环境中的多径传输而引起的衰落，一般它服从Rayleigh分布；（小尺度）

22/37

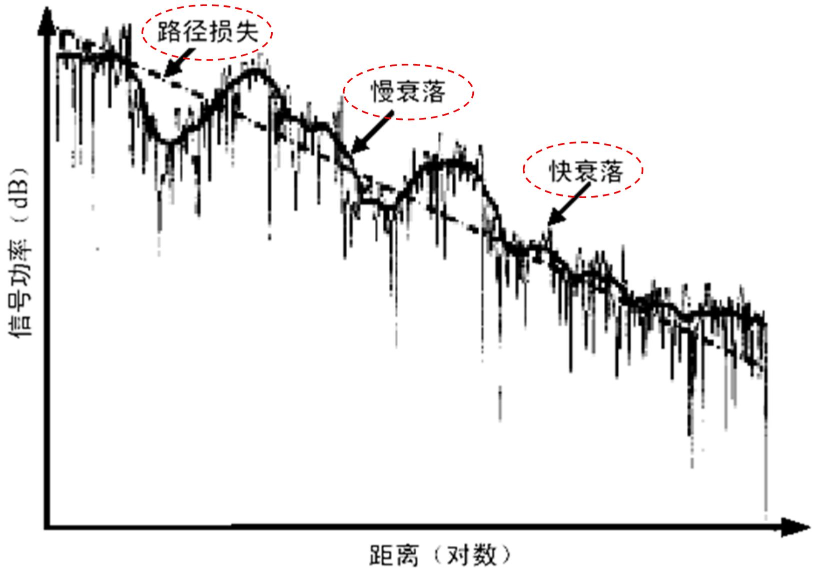


图 3.3.5 衰落信号的路径损失、慢衰落与快衰落

随参信道的特征：

① 衰耗随时变化；

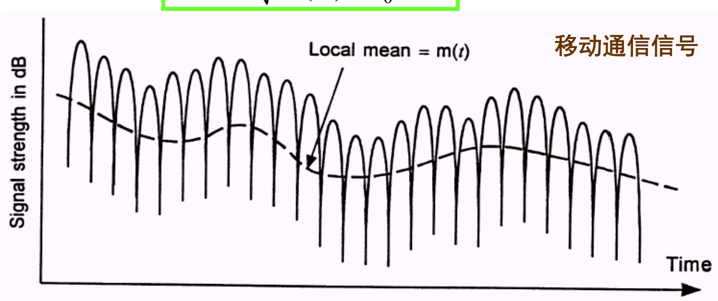
② 传输时延随时变化；

③ 出现多径传播现象；

以移动通信为例分析多径传输：

基台发送： $s_0(t) = a_0 \exp\{j(2\pi f_0 t + \phi_0)\}$

接收信号幅度： $\boxed{\sim \sqrt{P(d)} \cdot a_0}$



小尺度衰落可以如下分析：

移动台收到信号是N条从散射体反射来的信号和；

$$s(t)=\sum_{i=1}^{N}a_i s_0(t-\tau_i)$$

$$\tau_i=\overline{\tau}+\Delta\tau_i \text{，其中 } \overline{\tau}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\tau_i$$

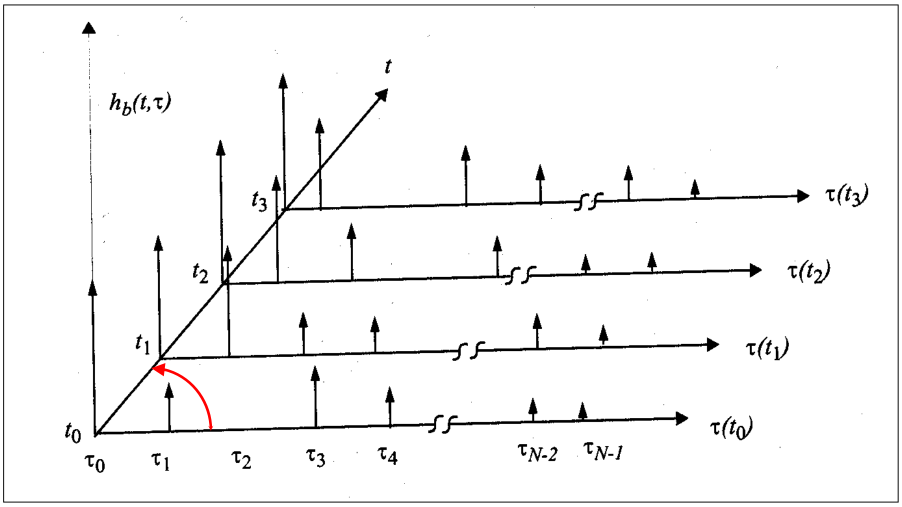
$$s(t)=x(t-\overline{\tau})\cdot\exp[j2\pi f_0(t-\overline{\tau})+j\phi_0]$$

$$\boxed{x(t)=a_0\left\{\sum_{i=1}^{N}a_i\exp[-j2\pi f_0\Delta\tau_i]\right\}}$$

移动台和散射体都保持静止时，则 $x(t)$ 和时间无关。

25/37

多径信道的基带冲激响应模型(补充)



26/37

考虑到运动情况：

$$s(t) = x(t)\exp\{j\phi_0\}\cdot\exp\{j2\pi f_0 t\}$$

其中 $$x(t) = \sum_{i=1}^{N} a_0 a_i(t)\exp\{-j2\pi f_0 \tau_i(t)\}$$

令 $$R(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i(t)\cos[2\pi f_0 \tau_i(t)]$$

$$S(t) = \sum_{i=0}^{N} a_i(t)\sin[2\pi f_0 \tau_i(t)]$$

则 $$x(t) = a_0\left[R(t) - jS(t)\right] = A(t)\cdot e^{j\Psi(t)}$$

幅度 $$A(t) = a_0\sqrt{R^2(t) + S^2(t)}$$

相位 $$\Psi(t) = \arctan\frac{S(t)}{R(t)}$$

- 由于f_0通常非常高，所以只要很小的时延就可使 $2\pi f_0 \tau_i$ 的变化非常大；
- $R(t)$和$S(t)$都是许多小量的和，由中心极限定理， $R(t)$和$S(t)$服从高斯分布，其矢量表示的幅度$A(t)$服从Rayleigh分布，相位是均匀分布。

27/37

Rayleigh Distribution

- Consider a carrier signal at frequency ω_0 and with an amplitude a

$$s(t) = a\exp(j\omega_0 t)$$

- The received signal is the sum of n waves

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^{n} a_i \exp(j\omega_0 t + \theta_i) = r\exp[j(\omega_0 t + \theta)] = r\exp(j\theta)\exp(j\omega_0 t)$$

where

$$r\exp(j\theta) = \sum_{i=1}^{n} a_i \exp(\theta_i)$$

define

$$r\exp(j\theta) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cos(\theta_i) + j\sum_{i=1}^{n} a_i \sin(\theta_i) = x + jy$$

We have

$$x \equiv \sum_{i=1}^{n} a_i \cos(\theta_i) = r\cos(\theta) \quad \text{and} \quad y \equiv \sum_{i=1}^{n} a_i \sin(\theta_i) = r\sin(\theta)$$

28/37

Rayleigh Distribution

- It can be assumed that x and y are Gaussian random variables with mean equal to zero due to the following reasons
  - n is usually very large.
  - The individual amplitude a_i are random.
  - The phases θ_i have a uniform distribution.
- Because x and y are independent random variables, the joint distribution $p(x,y)$ is

$$p(x,y) = p(x)p(y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)$$

- σ^2 is the time average power of the received signal before envelope detection (包络检波前所接收信号包络的时间平均功率)
- σ is the rms value of the received voltage signal before envelope detection (包络检波前所接收电压信号的均方根值)

29/37

Rayleigh Distribution

- The distribution $p(r,\theta)$ can be written as a function of $p(x,y)$

$$p(r,\theta) = |J|p(x,y)$$

$$|J| = \begin{vmatrix} \partial x/\partial r & \partial x/\partial\theta \\ \partial y/\partial r & \partial y/\partial\theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\theta & -r\sin\theta \\ \sin\theta & r\cos\theta \end{vmatrix} = r$$

- We have $$p(r,\theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$
- The Rayleigh distribution has a pdf given by

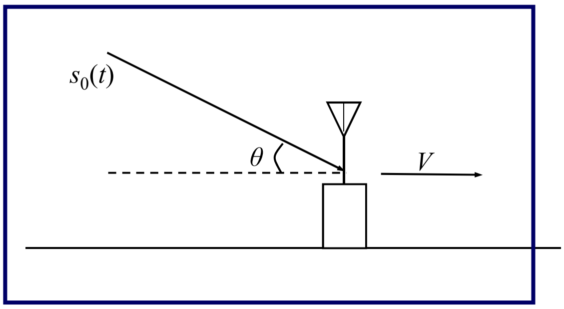
$$p(r) = \int_0^{2\pi} p(r,\theta)d\theta = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & r \ge 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

30/37

当接收机运动时，还会产生多普勒频移

若发射信号为 $s_0(t) = a_0 \exp\left[j2\pi f_0 t + \phi_0 \right]$

则收到信号为 $s(t) = a_0 \exp\left[j(2\pi f_0 t + \phi_0 - 2\pi \cdot \dfrac{V}{\lambda} t \cdot \cos\theta) \right]$



多普勒频移

$$f_d = \frac{V}{\lambda}\cos\theta$$

考虑到接收机的运动，则由各散射体引起的总信号为：

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N} a_0 a_i(t) \exp\left\{ j(2\pi f_0 t + \phi_0 - 2\pi \frac{V}{\lambda} t \cos\theta_i + \phi_i(t)) \right\}$$

$$= A_T(t) \exp(j\Psi_T(t)) \cdot \exp\left\{ j(2\pi f_0 t + \phi_0) \right\}$$

其中 $A_T(t) = \left\{ \left[a_0 \sum_{i=1}^{N} a_i(t) \cos\psi_i(t) \right]^2 + \left[a_0 \sum_{i=1}^{N} a_i(t) \sin\psi_i(t) \right]^2 \right\}^{1/2}$

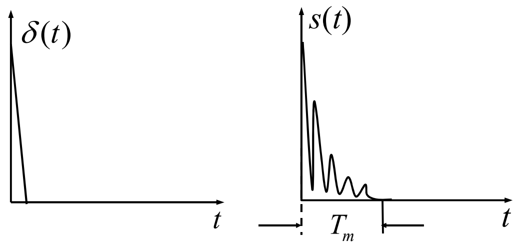
$$\Psi_T(t) = \arctan \frac{\sum_{i=1}^{N} a_i(t) \sin\psi_i(t)}{\sum_{i=1}^{N} a_i(t) \cos\psi_i(t)}$$

$$\psi_i(t) = \phi_i(t) - 2\pi \frac{V}{\lambda} t \cos\theta_i$$

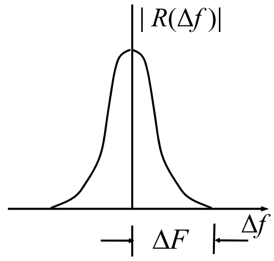
多径传输还会引起信号的时间展宽和频谱展宽

① 信号的时间展宽：

脉冲宽度被明显展宽，T_m 表示多径的延时时间差。



多径传输引起的信号时间展宽



间隔频率相关函数

$R(\Delta f)$ 表示信道的频率传递函数，$R(\Delta f)$ 描述多径传输对于二个频差为Δf的信号响应的相关性

相干带宽： $\Delta F = \dfrac{1}{T_m}$

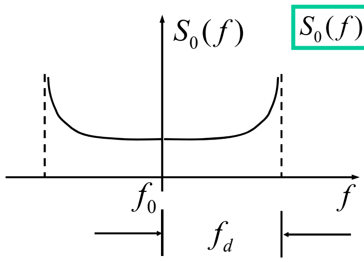
$W < \Delta F$ 频率非选择性衰落

$W > \Delta F$ 频率选择性衰落

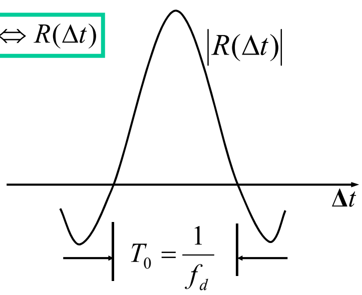
② 信号的频谱展宽

设发送一个单频信号 $s(t) = A\cos 2\pi f_0 t$ ，对于移动接收来说，由于不同方向的反射体反射回来的信号具有不同的多普勒频移，所以接收到的信号$s_0(t)$的频谱展宽。

$\boxed{S_0(f) \Leftrightarrow R(\Delta t)}$



接收信号的频谱扩展



间隔时间相关函数

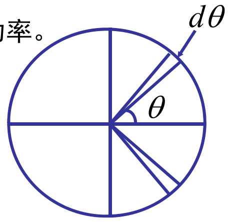
$R(\Delta t)$描述多径传输对于二个时差为Δt的信号响应的相关性。相干时宽T_0提供了信道衰落的快慢。通信信号的持续时间小于相干时宽T_0，则可以认为在通信过程中信道参数是不变的。

多普勒功率谱密度分析

设移动接收机的速度为 V，基站发送的是频率为 f_0、波长为 λ 的无调制连续波。散射信号入射角为 θ 时，接收信号的多普勒频移为：

$$f_d = V\cos\theta/\lambda = f_m\cos\theta\ ,\qquad f_m = V/\lambda$$

若接收天线是全向的，则接收信号中入射角在 $(\theta,\theta+d\theta)$ 中的信号分量的功率为 $P_{av}\,|d\theta|/2\pi$ ，其中 P_{av} 为平均接收到的总功率。



从 θ 和从 $-\theta$ 方向入射的电波具有相同的多普勒频移，

$$f = f_0 + f_m\cos\theta$$

入射角从 $\theta \to \theta + d\theta$ 时，相应频率从 $f \to f + df$

接收到信号的功率谱为 $S(f)$，在频率范围 $(f, f+df)$ 中的信号功率为

$$S(f)\,|df| = \frac{2P_{av}}{2\pi}\,|d\theta| \Rightarrow S(f) = \frac{P_{av}}{\pi}\cdot\left|\frac{d\theta}{df}\right|$$

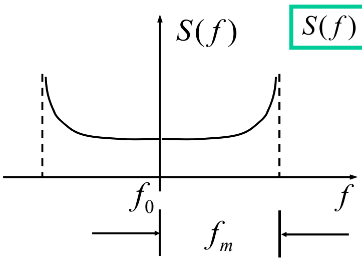
35/37

因为 $$df = -f_m\sin\theta\cdot d\theta$$

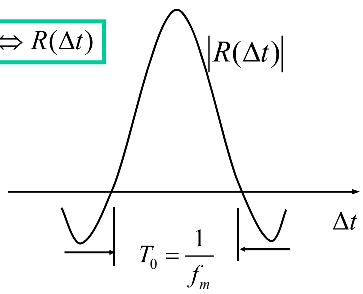
$$\sin\theta = \sqrt{1-\cos^2\theta} = \sqrt{1-\left(\frac{f-f_0}{f_m}\right)^2}$$

所以 $$S(f) = \frac{P_{av}}{\pi}\cdot\left|\frac{d\theta}{df}\right| \Rightarrow S(f) = \frac{P_{av}}{\pi}\left[f_m^2-(f-f_0)^2\right]^{-1/2}$$

$$R(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)\cdot e^{j2\pi f\Delta t}df = J_0(2\pi f_m\cdot\Delta t) \Leftarrow$$ 第一类零阶贝塞尔函数



$\boxed{S(f) \Leftrightarrow R(\Delta t)}$



36/37

相干带宽： $\Delta F = \frac{1}{T_m}$

$W < \Delta F$ 频率非选择性衰落信道（平衰落信道）

$W > \Delta F$ 频率选择性衰落信道

为什么相干带宽是由多径的时延特点决定的？

- 无线信道的冲激响应与它的幅度频率响应呈傅里叶变换对关系
- 由无线信道的幅度频率响应可以计算无线信道的频率相关函数

补充内容：

相干时宽： $T_0 = \frac{1}{f_m}$

$T_s < T_0$ 慢衰落信道

$T_s > T_0$ 快衰落信道

T_s：符号周期

为什么相干时宽是由多普勒频移特点决定的？

- 功率谱密度与时域的自相关函数呈傅里叶变换对关系
- 由时域的自相关函数可以计算时域的相关特性

37/37

习 题

- 3.3
- 3.9
- 3.10