第5章 小尺度衰落

5.1 小尺度衰落概述

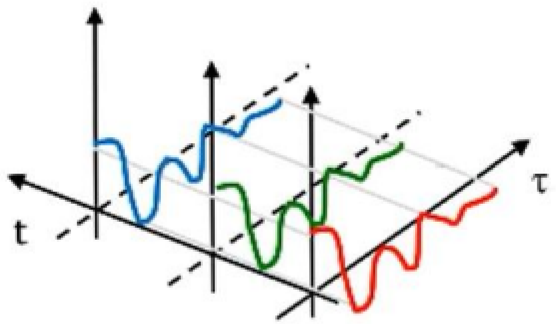
“小尺度”：信号强度经过短距离/短时延后急剧变化

分类：

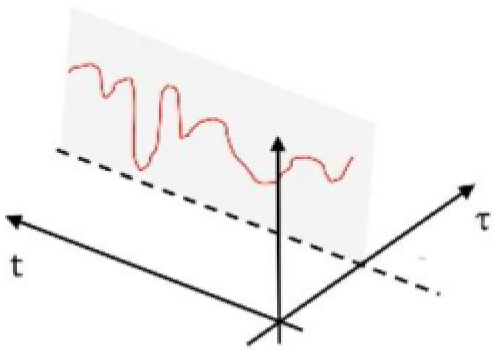
1. 发射端和接收端的相对运动 - 多普勒频移 - 信道的相干时间 - 慢衰落/快衰落
2. 发射端和接收端之间的多径传播 - 时延拓展 - 信道的相干带宽 - 平坦衰落/频率选择性衰落

信道的 时间域t 和 时延域τ

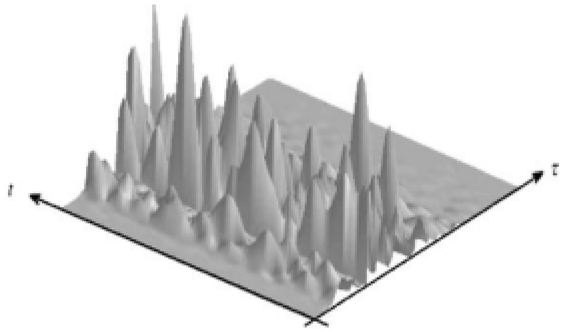
1. 线性时不变单径信道
2. 线性时不变多径信道



3. 线性时变单径信道



4. 线性时变多径信道



5.2 多普勒效应 - 慢衰落/快衰落

5.2.1 多普勒效应

发射端和接收端的相对运动 导致 传播路程差 进而导致 多普勒相移：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v\Delta t\cos\theta}{\lambda}$$

$$\text{其中 } \theta \text{ 是 接收台行进方向 转到 接收台指向发送台 的夹角}$$

多普勒相移 对时间求导 得到 多普勒频移：

$$f_d = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}\frac{1}{2\pi} = \frac{v\cos\theta}{\lambda}$$

多普勒最大频移：

$$f_d^{\max} = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{c}f_c$$

5.2.2 相干时间

1. 定义

在相干时间间隔内，信道冲激响应近似不变，两个到达的信号具有很强的幅度相关性

由此可知：如果符号周期大于信道相干时间，则符号传输过程中信道冲激响应可能发生改变，导致接收信号失真

2. 计算

$$T_C \approx \begin{cases} \frac{1}{(f_d)_{\max}} \\ \\ \frac{9}{16\pi}\cdot\frac{1}{(f_d)_{\max}} \ \left(\text{时间相关函数} > 0.5\text{的时间段长度}\right) \\ \\ \sqrt{\frac{9}{16\pi}}\cdot\frac{1}{(f_d)_{\max}} \approx 0.423\cdot\frac{1}{(f_d)_{\max}} \end{cases}$$

5.3 多径效应 - 平坦衰落/频选衰落

5.3.1 线性多径信道模型

1. 线性多径时变信道模型（一般）

$$\text{基带信号：} u\left(t\right)$$

$$\text{发射信号：} s\left(t\right)=\mathrm{Re}\left\{u\left(t\right)e^{j2\pi f_c t}\right\}$$

$$\text{假设 视距时延}\tau_0\text{、多径时延}\tau_n\text{、多径路径数量}N\text{ 都是时间}t\text{的函数}$$

$$\text{接收信号 视距分量：} r_1\left(t\right)=\mathrm{Re}\left\{u\left(t-\tau_0\left(t\right)\right)\cdot\alpha_0\left(t\right)\cdot e^{j2\pi\left(f_c+f_{0,D}\right)\left(t-\tau_0\left(t\right)\right)}\right\}+n\left(t\right)$$

$$\text{接收信号 多径分量：} r_2\left(t\right)=\mathrm{Re}\left\{\sum_{n=1}^{N(t)}u\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)\cdot\alpha_n\left(t\right)\cdot e^{j2\pi\left(f_c+f_{n,D}\right)\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)}\right\}+n\left(t\right)$$

$$\text{若不考虑噪声，则接收信号：}$$

$$r\left(t\right)=\mathrm{Re}\left\{\sum_{n=0}^{N(t)}u\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)\cdot\alpha_n\left(t\right)\cdot e^{j2\pi\left(f_c+f_{n,D}\right)\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)}\right\}$$

$$=\mathrm{Re}\left\{e^{j2\pi f_c t}\sum_{n=0}^{N(t)}u\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)\cdot\alpha_n\left(t\right)\cdot e^{j2\pi\left[f_c\left(-\tau_n\left(t\right)\right)+f_{n,D}\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)\right]}\right\}$$

$$=\mathrm{Re}\left\{e^{j2\pi f_c t}\sum_{n=0}^{N(t)}u\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)\cdot\alpha_n\left(t\right)\cdot e^{j\phi_n(t)}\right\}$$

$$\text{其中 }\phi_n\left(t\right)=2\pi\left[f_c\left(-\tau_n\left(t\right)\right)+f_{n,D}\left(t-\tau_n\left(t\right)\right)\right]$$

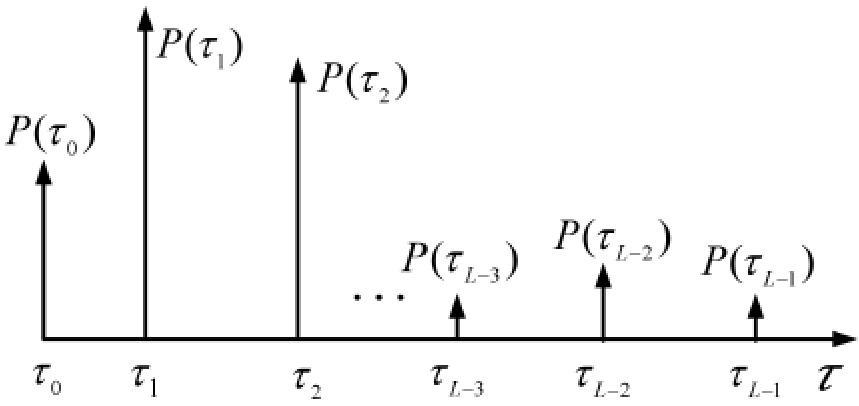
$$h\left(t,\tau\right)=\sum_{n=0}^{N(t)}\delta\left(\tau-\tau_n\left(t\right)\right)\alpha_n\left(t\right)e^{j\phi_n(t)}$$

2. 线性多径时不变信道模型

$$h\left(\tau\right)=\sum_{n=0}^{N}\delta\left(\tau-\tau_n\right)\alpha_n e^{j\phi_n}$$

5.3.2 时延扩展 Delay Spread, DS

（基于 线性多径时不变信道 讨论）



其中：

$$P(\tau_i) = |h(\tau_i)|^2 = |\delta(\tau-\tau_i)\alpha_i|^2 = \delta(\tau-\tau_i)|\alpha_i|^2$$

1. 最大时延扩展

$$\tau_{\max} = \tau_{L-1} - \tau_0$$

2. 方均根（RMS）时延扩展

对于某些时延很大的分量，如果其强度很弱，则可以忽略不计

—— 考虑引入时延分量的强度作为权重，得到 功率延迟分布 Power Delay Profile, PDP：

$$\text{（第}i\text{个时延分量的权重）} PDP = f(\tau_i) = \frac{|\alpha_i|^2}{\sum_{k=0}^{N}|\alpha_k|^2} \ \ (i=0,1,2,\ldots,N)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{一阶矩/均值 } \bar{\tau} = \sum_{i=0}^{N}[f(\tau_i)\cdot\tau_i] \\ \text{二阶矩/标准差 } \sigma_\tau = \begin{cases} \text{法1：} \sqrt{\sum_{i=0}^{N} f(\tau_i)(\tau_i-\bar{\tau})^2} \\ \text{法2：} \sqrt{\overline{\tau^2}-(\bar{\tau})^2} \ \ \text{其中 } \overline{\tau^2} = \sum_{i=0}^{N}\left(\frac{|\alpha_i|^2}{\sum_{n=0}^{N}|\alpha_n|^2}\cdot\tau_i^2\right) \end{cases} \end{cases}$$

其中的 $\bar{\tau}$ 即为平均附加延迟， σ_τ 即为 RMS（方均根）时延拓展

当多径分量数很大时，离散求和改为连续积分：

$$PDP = f(\tau) = \frac{|h(\tau)|^2}{\int |h(\tau)|^2 d\tau}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{一阶矩/均值 } \bar{\tau} = \int_0^\infty f(\tau)\cdot\tau\, d\tau \\ \text{二阶矩/标准差 } \sigma_\tau = \begin{cases} \text{法1：} \sqrt{\int f(\tau)(\tau-\bar{\tau})^2 d\tau} \\ \text{法2：} \sqrt{\overline{\tau^2}-(\bar{\tau})^2} \ \ \text{其中 } \overline{\tau^2} = \int\left(\frac{|h(\tau)|^2}{\int|h(\tau)|^2 d\tau}\cdot\tau^2\right)d\tau \end{cases} \end{cases}$$

常见信道的PDP：单边指数分布（如瑞利信道）

$$f\left(\tau\right)=\frac{1}{\bar{\tau}}e^{-\frac{\tau}{\bar{\tau}}}\ \left(\tau\geq0\right)$$

$$\text{其中 }\bar{\tau}=\int_0^{+\infty}f\left(\tau\right)\cdot\tau\,d\tau$$

$$\text{则其 均方根时延扩展：}\sigma_\tau=\sqrt{\int f\left(\tau\right)\left(\tau-\bar{\tau}\right)^2d\tau}=\bar{\tau}$$

5.3.3 相干带宽

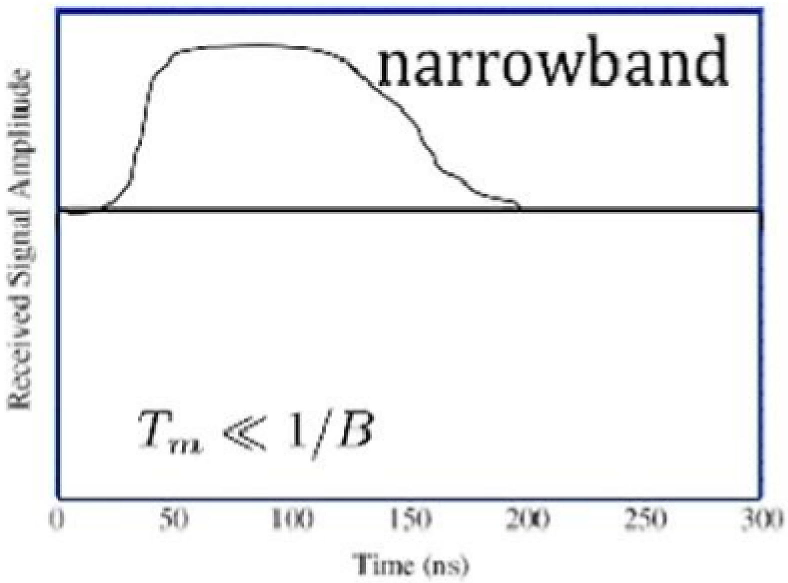
（基于 线性多径时不变信道 讨论）

1. 定义

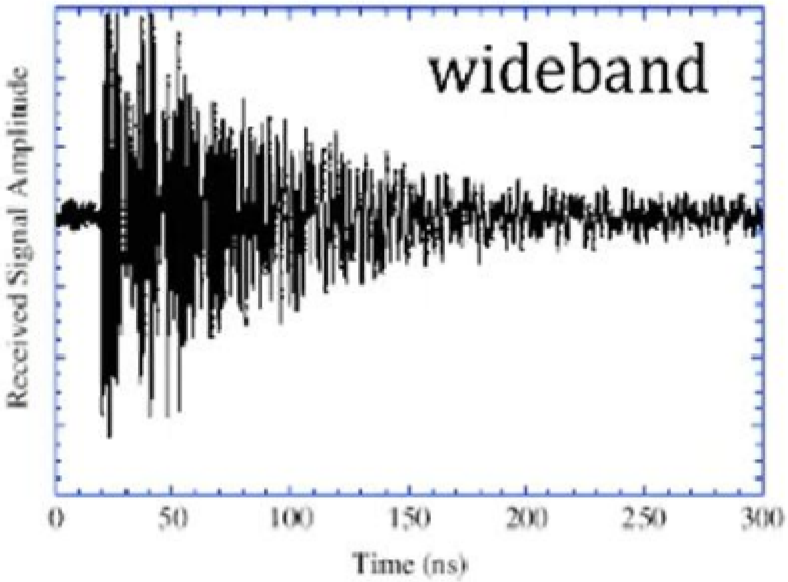
通过 信道相干带宽 的 频谱分量 以 几乎相同的增益和线性相位 通过（很强的幅度相关性）

由此可知：

1. 频域表述：
   1. 若 信号的符号带宽 小于 信道的相干带宽，则信号经历 平坦衰落（窄带）
   2. 若 信号的符号带宽 大于 信道的相干带宽，则信号经历 频率选择性衰落（宽带）
2. 时域表述：
   1. 信号的符号周期 大于 信道的时延拓展，在时域上表现为 信号的多个时延分量无法区分（重叠），可以近似认为所有的多径分量同时到达



      注：常用标准：$\sigma_\tau<0.1T_s$ （接收端不需要使用均衡器的常用标准）
   2. 信号的符号周期 小于 信道的时延拓展，在时域上表现为 信号的多个时延分量可以区分（无重叠）



2. 计算

$$\begin{cases}\rho=0.9 \ \Rightarrow \ B_c\approx\frac{1}{50\sigma_\tau}\\ \\ \rho=0.5 \ \Rightarrow \ B_c\approx\frac{1}{5\sigma_\tau}\end{cases}$$

5.4 平坦衰落（窄带衰落）时变信道模型 的 边缘分布

> 平坦衰落（窄带衰落）时变信道模型 属于 一个随机过程，可以分为 边缘分布 和 时变特性

5.4.1 瑞利衰落信道模型

1. 适用条件

1. 不存在视距（Line of Sight）分量

2. 推导

> 提前说明：虽然此处推导使用的是时不变信道模型，但是瑞利衰落、莱斯衰落、nakagami衰落都适用于时变信道

由前可知，线性时不变多径信道 的 冲激响应：

$$h\left(\tau\right)=\sum_{n=0}^{N}\delta\left(\tau-\tau_n\right)\alpha_n e^{j\phi_n}$$

对于窄带模型，近似认为所有时延分量同时到达：

$$h\left(\tau\right)=\sum_{n=0}^{N}\alpha_n e^{j\phi_n}$$

$$\text{衰落系数：}\beta=\sum_{i=0}^{N}a_i e^{j\phi_i}=\sum_{i=0}^{N}\left(a_i\cos\phi_i+j\sin\phi_i\right)=\sum_{i=0}^{N}\left[(\beta_I)_i+j(\beta_Q)_i\right]$$

$$记\ \beta = ae^{j\phi} = \beta_I + j\beta_Q$$

$$若：\begin{cases} 多径数N很大 \\ \\ 不存在直达径分量 \end{cases}$$

$$因为\ (\beta_I)_i\ 和\ (\beta_Q)_i\ 都是独立同分布$$

$$则\begin{cases} \beta_I,\ \beta_Q \sim N\left(0, \sigma^2\right) \Bigg\{ \\ \\ \beta_I,\ \beta_Q\ 相互独立 \end{cases}$$

$$(\ldots\ 推导\ \ldots)$$

$$则\begin{cases} a \sim Rayleigh\left(\sigma^2\right)\ 即\ f_A\left(a\right) = \begin{cases} \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}\ \ (0 \leq r < \infty) \\ \\ 0\ \ (r < 0) \end{cases} \\ \\ \phi \sim U\left(-\pi, \pi\right)\ 即\ f_\Phi\left(\phi\right) = \frac{1}{2\pi}\ \ (-\pi < \phi < \pi) \\ \\ a,\ \phi\ 相互独立 \end{cases}$$

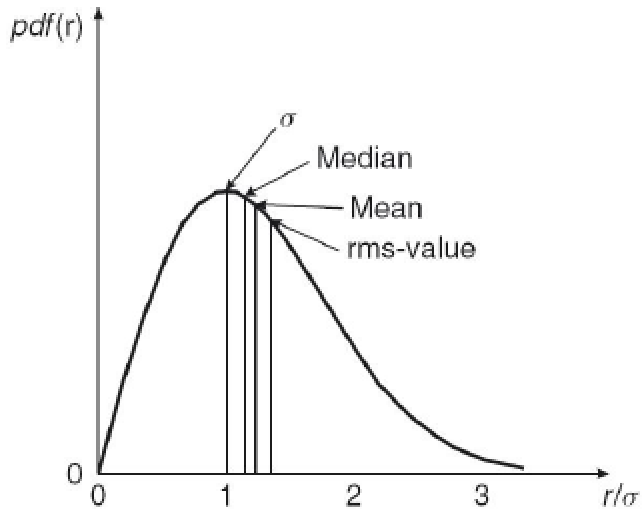
其中 σ^2 是 β_I，β_Q 的方差

> 注意：
>
> 1. 瑞利分布在实际测量中非常准确
> 2. 在瑞利衰落中不存在视距分量，因此是最差场景的结果
> 3. 仅仅依赖于单一参数 σ
> 4. 计算其他参数，如中断率、功率分布等非常方便

3. 幅度增益分布

$$a \sim Rayleigh\left(\sigma^2\right)\ 即\ f_A\left(a\right) = \begin{cases} \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}\ \ (0 \leq r < \infty) \\ \\ 0\ \ (r < 0) \end{cases}$$

统计特性：



$$
\begin{cases}
\text{均值 } \bar{a}=\int_0^{\infty} a f_A(a) da=\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \\
\text{均方值 } \overline{a^2}=\int_0^{\infty} a^2 f_A(a) da=2 \sigma^2 \int_0^{\infty} m e^{-m} dm=2 \sigma^2 \\
\text{均方根 } a_{rms}=\sqrt{\overline{a^2}}=\sqrt{2} \sigma \\
\text{方差 } D=\overline{a^2}-(\bar{a})^2=\left(2-\frac{\pi}{2}\right) \sigma^2 \approx 0.429 \sigma^2 \\
\text{中值 } a_{50}=\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 1.18 \sigma \\
\max \left\{f_A(a)\right\} \text{ 在 } a=\sigma \text{ 处}
\end{cases}
$$

4. 相位分布

$$\phi \sim U(-\pi, \pi) \text{ 即 } f_{\Phi}(\phi)=\frac{1}{2 \pi} \quad(-\pi<\phi<\pi)$$

5. 功率分布

假设 经历小尺度衰落前 的 信号功率 为 P_0，经历小尺度衰落后 的 信号功率为 P_r

则 小尺度衰落过程为：

$$P_r=a^2 P_0 \text{ 即 } a=\sqrt{\frac{P_r}{P_0}}$$

根据 幅度增益分布 可得：

$$f_{P_r}(p)=\frac{\sqrt{\frac{p}{P_0}}}{\sigma^2} e^{-\frac{\frac{p}{P_0}}{2 \sigma^2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{P_0}} \frac{1}{2 \sqrt{p}}=\frac{1}{2 \sigma^2 \cdot P_0} e^{-\frac{p}{2 \sigma^2 \cdot P_0}}=\frac{1}{\bar{P}} e^{-\frac{p}{\bar{P}}}$$

$$\text{其中 } \bar{P}=2 \sigma^2 \cdot P_0 \text{ 为 基于瑞利信道的平均接收功率}$$

$$\text{可知 } 2\sigma^2 \text{ 为 平均接收功率增益}$$

可知，接收功率 P_r 服从指数分布

6. 中断率

幅度增益式：

$$Pr\left[a \leq a_{\min}\right] = \int_0^{a_{\min}} f_A\left(a\right) da = 1 - e^{-\frac{a_{\min}^2}{2\sigma^2}} \overset{\text{当}a_{\min}\text{较小时}}{\approx} \frac{a_{\min}^2}{2\sigma^2}$$

接收功率式：

$$Pr\left[P_r < P_{\min}\right] = \int_0^{P_{\min}} \frac{1}{\bar{P}} e^{-\frac{p}{\bar{P}}} dp = 1 - e^{-\frac{P_{\min}}{\bar{P}}}$$

若要求中断率不超过 x，则有 衰落余量的计算：

$$1 - e^{-\frac{P_{\min}}{\bar{P}}} < x$$

$$FM = \frac{\bar{P}}{P_{\min}} > \frac{1}{\ln\frac{1}{1-x}} \overset{\text{当}x\text{较小时}}{\approx} \frac{1}{x}$$

（注：当同时考虑大尺度衰落和小尺度衰落的衰落余量时，总衰落余量线性相乘、分贝相加）

5.4.2 莱斯信道模型

1. 适用条件

1. 存在一个固定的视距分量

2. 幅度增益分布

$$f\left(a\right) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad \left(z \geq 0,\ A \geq 0\right)$$

$$\begin{cases} A \text{ 为 LOS分量的幅度增益} \\ \\ \sqrt{2\sigma^2} \text{ 为 非LOS分量的幅度增益的均值} \\ \\ I_0 \text{ 为 修正的零阶贝塞尔函数} \end{cases}$$

3. 功率增益分布

$$\text{平均衰减 } \bar{P}_r = \int_0^{\infty} a^2 f\left(a\right) da = A^2 + 2\sigma^2$$

$$\text{莱斯系数 } K = \frac{A^2}{2\sigma^2}$$

$$\begin{cases} K \to 0 \text{ 则 莱斯分布回退为瑞利分布} \\ \\ K\text{足够大 则 莱斯分布可近似为 } N\left(A, \sigma^2\right) \\ \left(\text{注：当 } x \gg 1 \text{ 时，} I_0(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} e^x\right) \end{cases}$$

5.4.3 Nakagami信道模型（*）

5.5 平坦衰落（窄带衰落）时变信道模型 的 时变特性

5.5.1 时变信道的分析方法

1. 衰落系数的自相关函数

对于信道的时变特性，通常使用衰落系数的自相关函数来分析：（相同 Δt 下，自相关函数值小，则变化越快 即 变化越剧烈）

$$\text{设 } \beta(t) \text{ 为信道增益，则有 } A_\beta(t,\ t+\Delta t) = E\left[\beta(t)\beta^*(t+\Delta t)\right]$$

假设信道是广义平稳的，则有

$$A_\beta(t,\ t+\Delta t) = A_\beta(\Delta t)$$

> 广义平稳随机过程：随机过程的一阶矩、二阶矩不随时间t发生变化

2. 信道增益的自相关函数 和 信道增益的功率谱密度

已知 信道增益的自相关函数 和 信道增益的功率谱密度 构成一对傅里叶变换对

$$A_\beta(\Delta t) \underset{\mathcal{F}^{-1}}{\overset{\mathcal{F}}{\rightleftharpoons}} S_\beta(f)$$

所以可以先求信道增益的功率谱密度（频域），然后做傅里叶逆变换得到信道增益的自相关函数

3. 信道增益的功率谱密度（功率-频率谱） 和 多普勒谱（功率-多普勒频偏谱）

信道增益的功率谱密度可以等价转换为多普勒谱

$$S_\beta(f) = S_\beta(f_d) \begin{cases} \text{功率谱密度 } S_\beta(f) \text{ 横轴为频率} f\text{，中心为载频} f_c \\ \\ \text{多普勒谱 } S_\beta(f_d) \text{ 横轴为多普勒频移} f_d\text{，中心为0} \end{cases}$$

4. 多普勒谱 和 功率-到达角谱

又知：

$$f_d = \frac{v\cos\theta}{\lambda} = (f_d)_{\max}\cos\theta,\ \theta\in[0,\pi]$$

则有：

$$S_\beta\left(f_d\right) = S_\beta\left(\theta\right)$$

$$\text{设 第}i\text{条路径}\begin{cases}\text{以}\theta_i\text{到达的概率 } p_i \\ \\ \text{在}\theta_i\text{方向上的天线增益 } G_i\end{cases}\quad \text{则 } S_\beta\left(\theta\right) = \bar{P}_r \times \sum_i p_i G_i$$

5.5.2 Clarke 模型

1. 适用条件

1. 不存在LOS分量
2. 均匀散射：信号从各个方向到达的概率相同
3. 各个方向的天线增益相同

2. 推导

第1步：

由 2、3 条件得到：

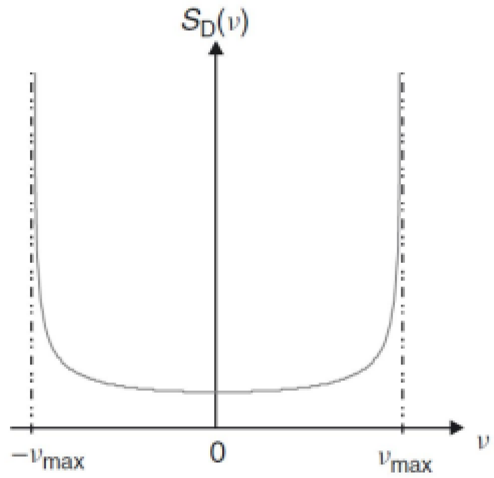
$$\begin{cases}p\left(\theta\right) = p\left(-\theta\right) = \frac{1}{2\pi} \\ \\ G\left(\theta\right) = G\left(-\theta\right) = G_0\end{cases}\ \Rightarrow\ S_\beta\left(\theta\right) = \bar{P}_r\cdot\frac{G_0}{\pi}$$

（对于 垂直$\frac{\lambda}{4}$天线，则 $G_0 = 1.5$）

第2步：

由 功率-到达角谱 推导 功率-多普勒频偏谱（Jakes谱）：

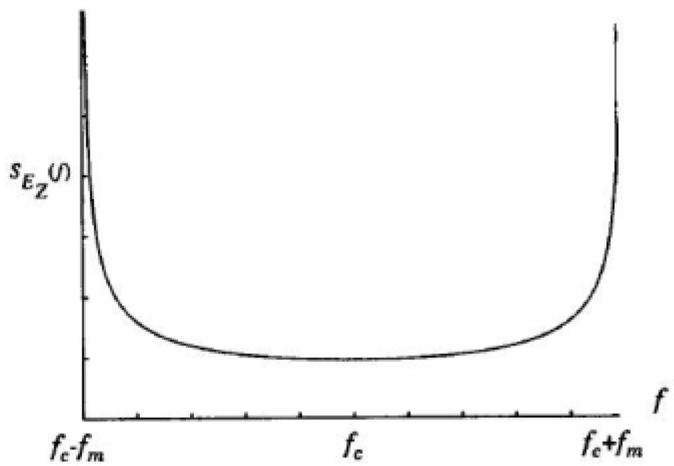
$$S_\beta\left(f_d\right) = S_\beta\left(\theta\right)\left|\frac{d\theta}{df_d}\right| = \begin{cases}\bar{P}_r\cdot\frac{1.5}{\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{\left(f_d^{\max}\right)^2 - f_d^2}},\ \ -f_d^{\max} < f_d < f_d^{\max} \\ \\ 0,\ otherwise\end{cases}$$



第3步：

推导 功率-频率谱（功率谱密度）：

$$S_\beta(f)=\begin{cases}\bar{P}_r\cdot\frac{1.5}{\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{\left(f_d^{\max}\right)^2-\left(f-f_c\right)^2}},\ f_c-f_d^{\max}<f_d<f_c+f_d^{\max}\\ \\ 0,\ otherwise\end{cases}$$

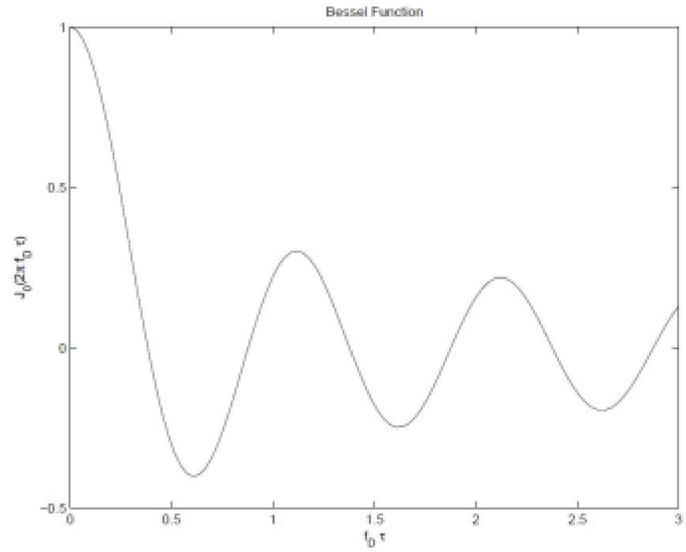


第4步：

由 功率谱密度 求 自相关函数：

$$A_\beta(\Delta t)=\mathscr{F}^{-1}\left[S_\beta(f)\right]=\bar{P}_r\cdot J_0\left(2\pi f_d^{max}\Delta t\right)$$

其中 $J_0(\cdot)$ 为 零阶贝塞尔函数



横轴：$f_d^{max}\Delta t$

纵轴：自相关函数值

由图可知，纵轴值为0时，横轴的值约为0.4

$$f_d^{max}\Delta t \approx 0.4 \Rightarrow \begin{cases} v\Delta t \approx 0.4\lambda \text{ 即 以}v\text{运动}0.4\lambda\text{后不相关} \\ \\ \Delta t \approx \frac{0.4}{f_d^{max}} = \frac{0.4\lambda}{v} \text{ 即 相干时间 } T_c \approx \frac{0.4}{f_d^{max}} = \frac{0.4\lambda}{v} \end{cases}$$

$$\left(\sqrt{\frac{9}{16\pi}} \approx 0.4\right)$$

5.5.3 电平通过和衰落统计

1. 定义

电平通过率 N_R： 窄带增益包络 $z(t)$ 从正向穿过某一电平门限 Z 的平均速率（信道变差的频率）

平均衰落时间 $\bar{\tau}$： 窄带增益包络 $z(t)$ 低于某一电平门限 Z 的平均时间（信道变差的时长）

2. Clarke模型下的结论：

基于Clarke模型假设：

$$\begin{cases} \text{窄带增益包络 } z(t) = |\beta(t)| \\ \\ \text{信道平均增益 } E\left[z^2(t)\right] = 2\sigma^2 \end{cases}$$

经过推导，可以得到：

$$\begin{cases} N_R = \sqrt{2\pi} \cdot f_d^{\max} \cdot \frac{z}{\sqrt{2\sigma^2}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \\ \\ \bar{\tau} = \frac{\sigma}{z f_d^{\max}\sqrt{\pi}}\left[e^{\frac{z^2}{2\sigma^2}} - 1\right] \end{cases}$$

若 定义 方均根归一化后的包络：

$$\rho = \frac{z}{z_{rms}} = \frac{z}{\sqrt{E\left[z^2\left(t\right)\right]}} = \frac{z}{\sqrt{2\sigma^2}}$$

则：

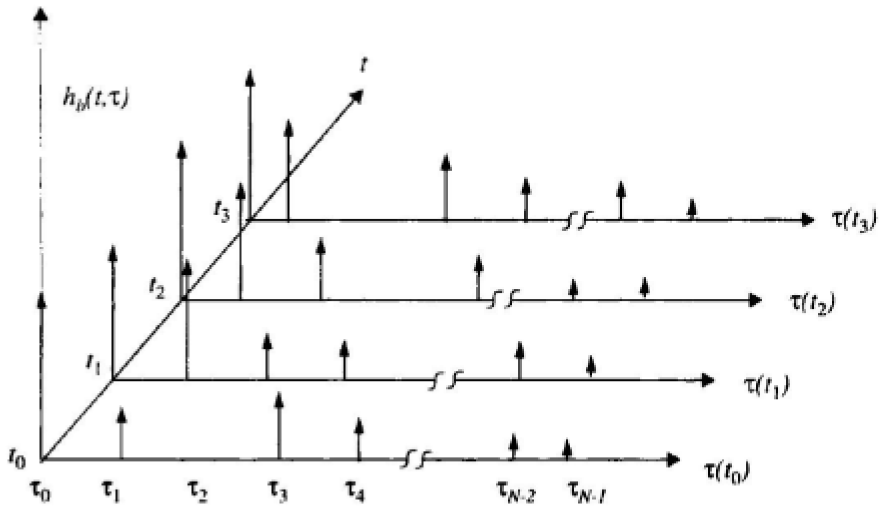
$$\begin{cases} N_R = \sqrt{2\pi} \cdot f_d^{\max} \cdot \rho e^{-\rho^2} \\ \\ \bar{\tau} = \frac{1}{\rho f_d^{\max} \sqrt{2\pi}} \left[e^{\rho^2} - 1\right] \end{cases}$$

5.6 频选衰落（宽带衰落）时变信道模型

线性时变多径信道：

$$h\left(t, \tau\right) = \sum_{n=0}^{N(t)} \delta\left(\tau - \tau_n\left(t\right)\right) \alpha_n\left(t\right) e^{j\phi_n(t)}$$

对于宽带衰落模型，需要综合考虑 时间域 和 时延域



5.6.1 附加时延段 和 分析带宽

将信道冲激响应的多径时延 τ 离散化为相同的时延段 即 附加时延段 $\Delta\tau$，每个时延段宽度由系统的分析带宽决定：

$$B_{sys} = \frac{2}{\Delta\tau}$$

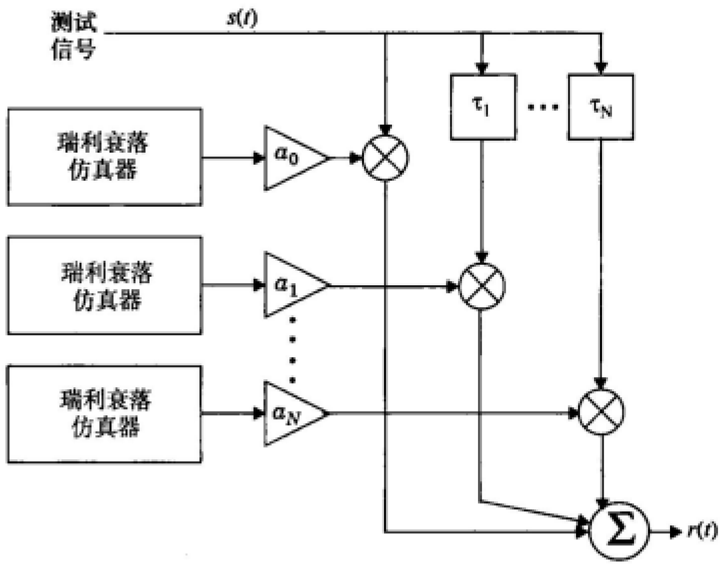
5.6.2 WSS-US假设 和 抽头延迟线（TDL）模型

1. WSS-US 假设

一般情况下，线性时变多径宽带信道：$A_h\left(\tau, \tau+\Delta\tau; t, t+\Delta t\right) = E\left[h^*\left(\tau, t\right) h\left(\tau+\Delta\tau, t+\Delta t\right)\right]$

$$\begin{cases} WSS\text{假设：} A_h\left(\tau, \tau+\Delta\tau; t, t+\Delta t\right) = A_h\left(\tau, \tau+\Delta\tau; \Delta t\right) \\ \\ US\text{假设：} A_h\left(\tau, \tau+\Delta\tau; \Delta t\right) = A_h\left(\tau; \Delta t\right) \end{cases}$$

2. 抽头延迟线（TDL）模型



（在 WSS-US假设 下）

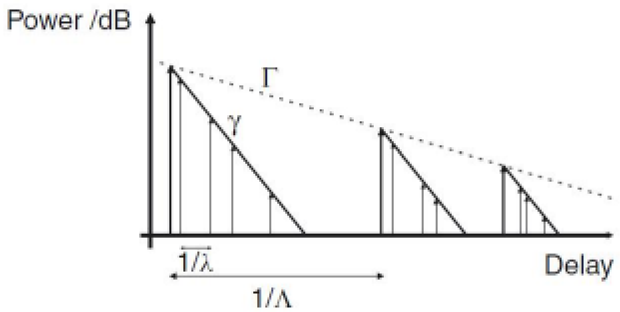
1. 包含M个时变抽头，抽头间隔 $\Delta\tau < \frac{1}{B}$
2. 信道持续时间超过延迟拓展 $M\Delta\tau > \sigma_\tau$
3. 每一个抽头是一个独立随机过程（瑞利、莱斯）

5.6.3 基于簇-径的宽带信道模型

在许多小尺度衰落信道实际测量中，多径分量的到达可以 往往按照"簇"和"径"区分

1. Saleh - Valenzuela（S-V）信道模型

PDP：



特点：

1. 簇的到达服从均值为Λ的泊松分布
2. 一个簇内，径的到达服从另一个泊松分布

5.7 空时信道模型

（...）