

## 第4章 大尺度衰落 Large Scale Fading, LSF

### 4.1 基础知识

#### 4.1.3 信道衰落概述

### 4.2 路径损耗 Path Loss, PL

#### 4.2.1 自由空间传播模型

##### 1. Friis 公式

##### 2. 参考点式

#### 4.2.2 一般空间传播模型

##### 1. 参考点式

#### 4.2.3 三种基本传播机制

##### 1. 反射

地面反射（双线）模型

##### 2. 绕射

费涅耳区

等高刀形绕射模型

不等高刀形绕射模型

多重刀形绕射模型

##### 3. 散射

#### 4.2.4 室外传播模型

##### 1. Okumura 模型

##### 2. Hata 模型

###### 1. 城市

###### 2. 城镇

###### 3. 农村

### 4.3 阴影效应 Shadowing, SD

#### 4.3.1 分布

#### 4.3.2 相关性

### 4.4 完整的大尺度衰落

#### 1. 公式推导

#### 2. 可靠性和中断率

情形1：仅考虑 路径损耗（确定性）

情形2：考虑 路径损耗（确定性）和 阴影效应（随机性）

#### 3. 衰落余量 Fading Margin, FM

#### 4. 有效服务区域的百分比

### 4.5 噪声系数计算（附录B）

#### 4.5.1 分类

#### 4.5.2 噪声功率

#### 4.5.3 噪声系数

##### 1. 定义

##### 2. 对于 增益为G的器件

对于 负性负载（室温下的传输线或衰减器）

对于 负性元件组成的天线

##### 3. 对于 由增益为G的器件 组成的 级联系统

#### 4.5.4 等效噪声温度

##### 1. 对于 增益为G的器件

##### 2. 对于 由增益为G的器件 组成的 级联系统

### 4.6 链路计算

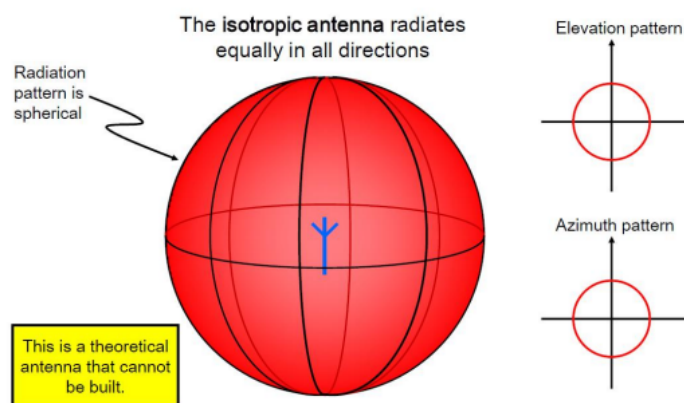
# 第4章 大尺度衰落 Large Scale Fading, LSF

## 4.1 基础知识

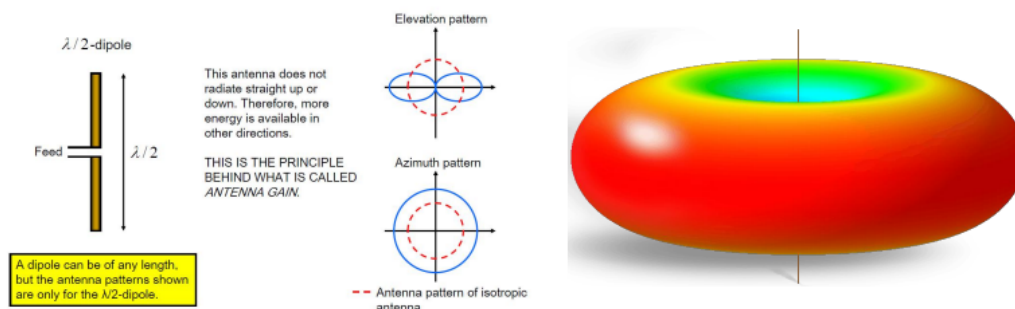
分贝 / 分贝瓦 / 分贝毫瓦

$$\begin{cases} X|_{dB} = 10 \log \left( \frac{X|_{non-dB}}{X_{ref}|_{non-dB}} \right) \\ X|_{non-dB} = 10^{\frac{X|_{dB}}{10}} \end{cases}$$
$$\begin{cases} P|_{dB} = 10 \log \left( \frac{P|_W}{1|_W} \right) \\ P|_{dBm} = 10 \log \left( \frac{P|_{mW}}{1|_{mW}} \right) \\ P|_{dBm} = P|_{dB} + 30|_{dB} \end{cases}$$

理想全向天线：各方向具有相同单位增益的天线（无线通信系统的参考天线）



半波长偶极子天线：（相比于 理想全向天线，半波长偶极子天线具有2.15dB的增益）



等效全向辐射功率（EIRP）：对于一个无线系统，选择其最大方向的辐射功率；如果采用理想全向天线，在此方向获得相同的辐射功率，所需要的输入功率

等效发射功率（ERP）：（将 EIRP 中的 理想全向天线 换为 半波偶极子天线）

$$\begin{cases} EIRP = P_t G_t = P_t [dBm] + G_t [dB] \\ ERP [dBm] = EIRP [dBm] - 2.15 [dB] \end{cases}$$

### 4.1.3 信道衰落概述

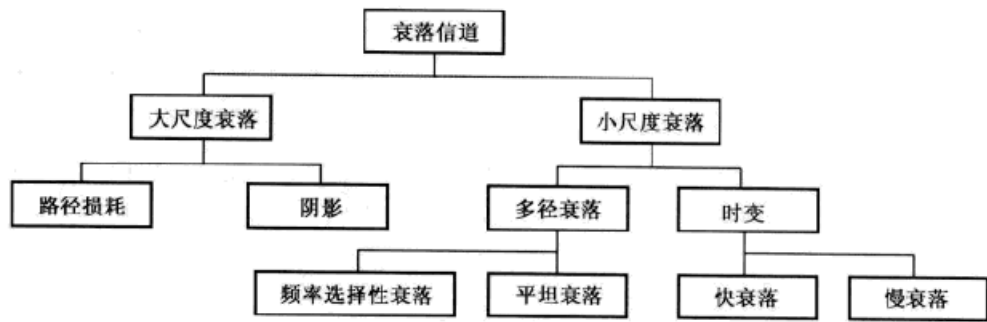


图 1.1 衰落信道的分类

<https://blog.csdn.net/ddatale>

(多径衰落 - 多径传播引起)

(时变 - 相对运动引起)

## 4.2 路径损耗 Path Loss, PL

### 4.2.1 自由空间传播模型

自由空间：均匀无损耗的无限大空间（各向同性、电导率为零、相对介电系数和相对磁导率均恒为1）

#### 1. Friis 公式

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} [W]$$

推导：

$$\text{自由空间中的能流密度：} P_d = \frac{EIRP}{4\pi d^2} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} [W/m^2]$$

距离发射机 $d$ 处的接收信号功率： $P_r(d) = P_d \cdot A_e$  其中 $A_e$ 为天线有效截面积

$$\text{接收天线增益：} G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

若加入系统损耗 $L$ ，则：

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} [W]$$

适用条件：

$$d > d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

其中 $D$ 为天线最大物理线性尺寸（若矩形，则为对角线）

2. 参考点式

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (d \geq d_0 \geq d_f)$$

4.2.2 一般空间传播模型

1. 参考点式

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d_0}{d} \right)^n \quad (d \geq d_0 \geq d_f)$$

表 4.2 不同环境下的路径损耗指数

环境	路径损耗指数, $n$
自由空间	2
市区蜂窝无线传播	2.7~3.5
存在阴影衰落的市区蜂窝无线传播	3~5
建筑物内的视距传播	1.6~1.8
被建筑物阻挡	4~6
被工场阻挡	2~3

路径损耗：

$$\text{由} \begin{cases} P_r(d_0) = \frac{P_t}{PL_0} \\ P_r(d) = \frac{P_t}{PL} \quad (\text{均为线性}) \\ P_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d_0}{d} \right)^n \end{cases}$$

$$\text{得} \frac{P_t}{PL} = \frac{P_t}{PL_0} \left( \frac{d_0}{d} \right)^n \quad \text{即} \quad PL = PL_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^n$$

$$\text{转换为分贝} \quad PL[dB] = PL_0 + n \times 10 \log \frac{d}{d_0}$$

4.2.3 三种基本传播机制

接收功率是基于反射、散射和绕射等大尺度传播模型预测的最重要参数。

1. 反射

反射：电磁波遇到比波长大得多的物体时，发生发射，常发生在地球表面、建筑物和墙壁表面；

当电磁波传输到两个具有不同介电特性的介质分界处时，发生反射；

如果平面波入射到理想电介质表面时，部分能量透射，部分能量反射；

当平面波入射到理想导体时，全部能量反射；

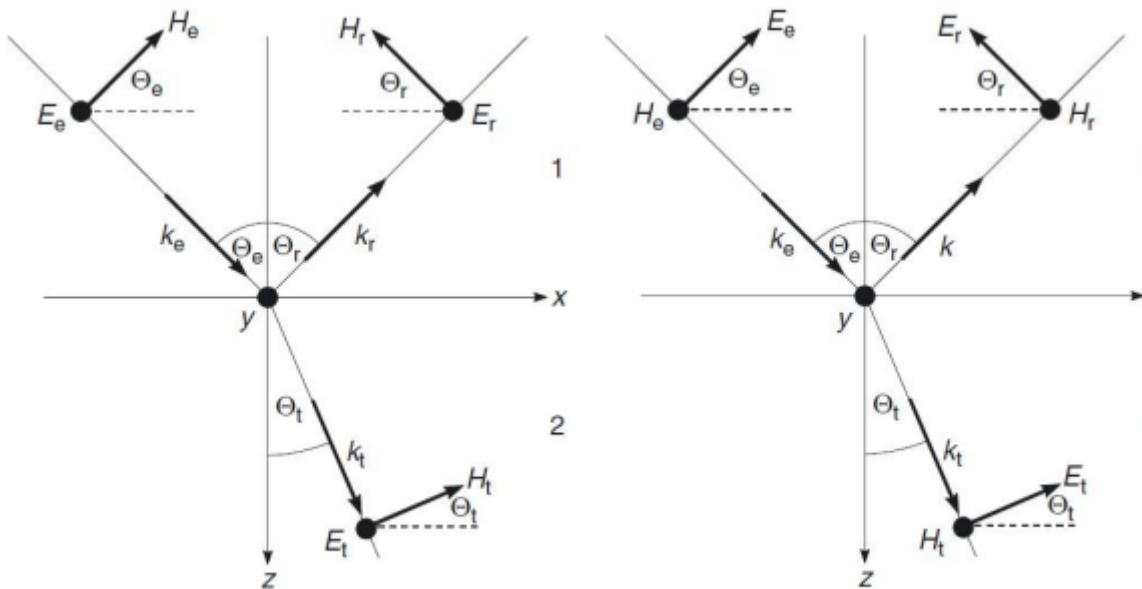


Figure 4.1 Reflection and transmission.

(左垂直，右平行)

$$snell \text{ 定理 } \begin{cases} \text{反射: } \Theta_e = \Theta_r \\ \text{投射: } \frac{\sin \Theta_t}{\sin \Theta_e} = \frac{\sqrt{\delta_1}}{\sqrt{\delta_2}} \end{cases}$$

$$\text{反射系数} \begin{cases} \rho_{\perp} = \frac{\sqrt{\delta_2} \cos \Theta_e - \sqrt{\delta_1} \cos \Theta_t}{\sqrt{\delta_2} \cos \Theta_e + \sqrt{\delta_1} \cos \Theta_t} \\ \rho_{\parallel} = \frac{\sqrt{\delta_1} \cos \Theta_e - \sqrt{\delta_2} \cos \Theta_t}{\sqrt{\delta_1} \cos \Theta_e + \sqrt{\delta_2} \cos \Theta_t} \end{cases}$$

### 地面反射（双线）模型

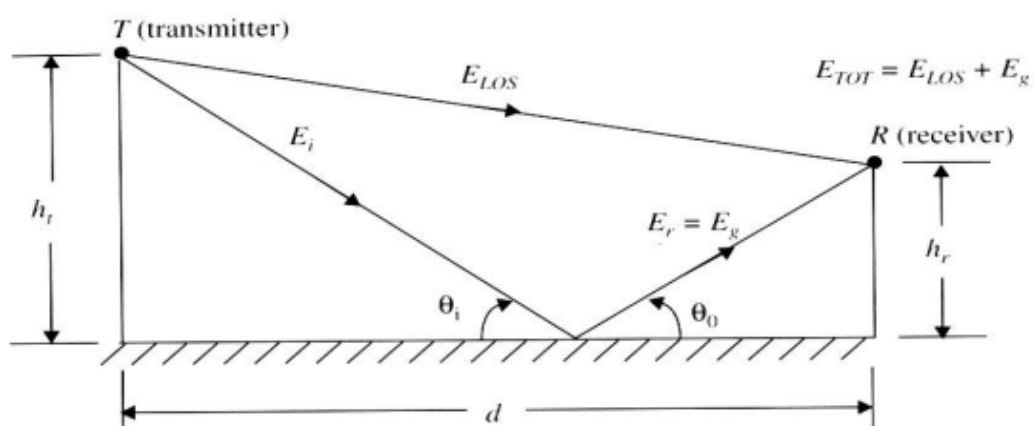


Figure 4.7 Two-ray ground reflection model.

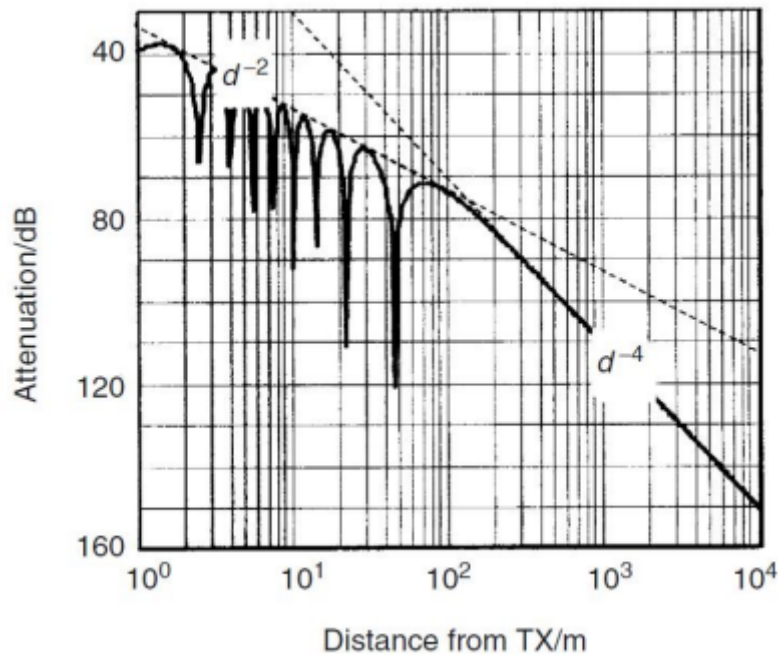
条件：

1. 在预测几千米范围内的信号强度非常准确  $d > 10(h_t + h_r)$
2. 假设天线高度超过50米

计算式：双线模型在距离  $d$  处的接收功率：

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

断点式：



当传输距离不超过 $d_{\text{break}}$ 时，路径衰减系数 $n=2$ ；

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2, d_0 < d < d_{\text{break}}$$

当传输距离超过 $d_{\text{break}}$ 时，路径衰减因子 $3.5 \leq n \leq 4.5$ 。

$$P_r(d) = P_r(d_{\text{break}}) \left( \frac{d_{\text{break}}}{d} \right)^n, d > d_{\text{break}}$$

## 2. 绕射

绕射：T-R之间的无线路径被尖锐的边缘阻挡时将发生绕射；

与发射对比：理想反射情况往往用于描述尺寸无限大的物体；电磁波遇到有限尺寸的障碍物时存在明显的绕射现象；

绕射现象可以通过惠更斯原理解释；

## 费涅耳区

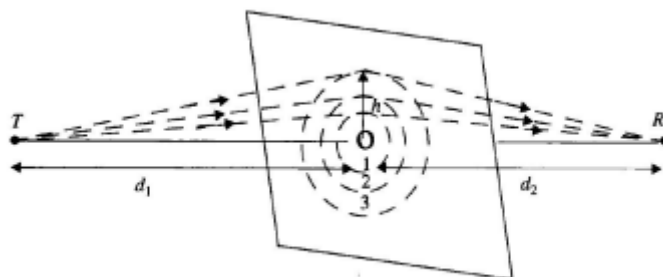


图 4.11 定义了连续费涅耳区边界的同心圆

(绕射现象可以利用费涅耳区定性地解释)

费涅耳区：存在一个连续区域（椭球），绕射次级路径长度要比视距路径长度大  $\frac{n\lambda}{2}$

结论：

1. 第n个费涅耳区同心圆的半径： $r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$

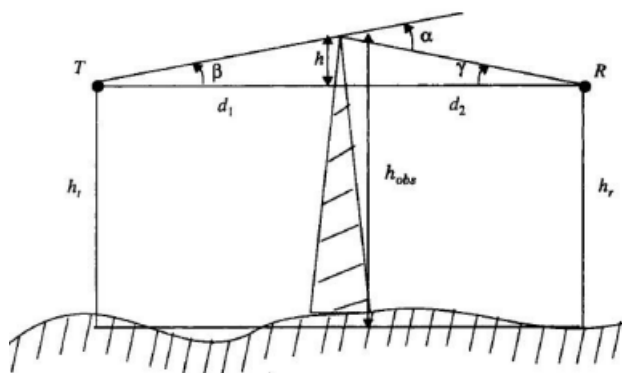
2. 当障碍物不阻挡第一费涅耳区时，绕射损失可以忽略不计

第一费涅耳区不同路径电磁波到达接收天线的作用相近（constructive），当第一费涅耳区未被遮挡时，接收点的信号是最强的

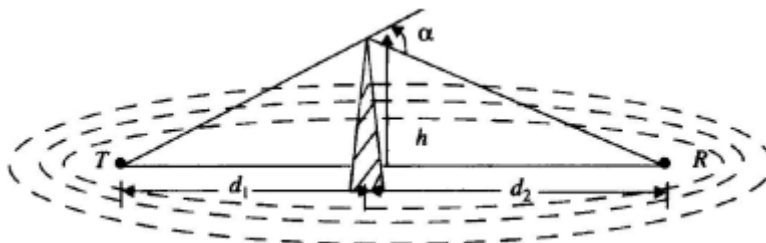
3. 费涅耳区可以用来解释路径损耗中的断点模型：随着T-R距离的增加，第一费涅耳区（椭球）也在变大。当第一费涅耳区与地面接触时，反射信号与直达波信号的相位相差  $\pi$ ，此时，反射点的位置也就是断点模型中，断点所在的位置。

## 等高刃形绕射模型

(中间的刀刃纵向无限大，也就是说，只能从其上方绕射)



刀形绕射几何特性。点T表示发射机，点R表示接收机，并且无限宽刃形阻挡了视距路



$$\text{附加路径长度} = \text{绕射路径} - \text{直射路径} = \Delta = \frac{h^2}{2} \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2}$$

无量纲的Fresnel-Kirchoff参数:  $\nu = h\sqrt{\frac{2(d_1+d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$

绕射增益  $G_d[dB] = 20 \log|F(\nu)|$  近似如下:

$$\begin{aligned} G_d(\text{dB}) &= 0 & \nu \leq -1 \\ G_d(\text{dB}) &= 20\log(0.5 - 0.62\nu) & -1 \leq \nu \leq 0 \\ G_d(\text{dB}) &= 20\log(0.5 \exp(-0.95\nu)) & 0 \leq \nu \leq 1 \\ G_d(\text{dB}) &= 20\log(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1\nu)^2}) & 1 \leq \nu \leq 2.4 \\ G_d(\text{dB}) &= 20\log\left(\frac{0.225}{\nu}\right) & \nu > 2.4 \end{aligned}$$

### 不等高刀刃绕射模型

...

### 多重刀刃绕射模型

...

## 3. 散射

散射: 传播介质中存在小于波长的物体, 且单位体积内阻挡体的个数巨大时, 发生散射。常发生在粗糙表面、小物体或不规则物体处;

当障碍物的尺寸小于波长, 或与波长相当时, 发生散射;

## 4.2.4 室外传播模型

Okumura模型 和 Hata模型 都是基于大量实际测量数据拟合得到的经验模型

### 1. Okumura 模型

适用条件:

1. 频率: 150MHz 到 1920MHz (最高可到3000MHz)
2. 距离: 1km 到 100km
3. 天线高度: 30m 到 1000m
4. 地区: 城市 (用于 **城市** 信号强度预测最常用的估计模型之一)

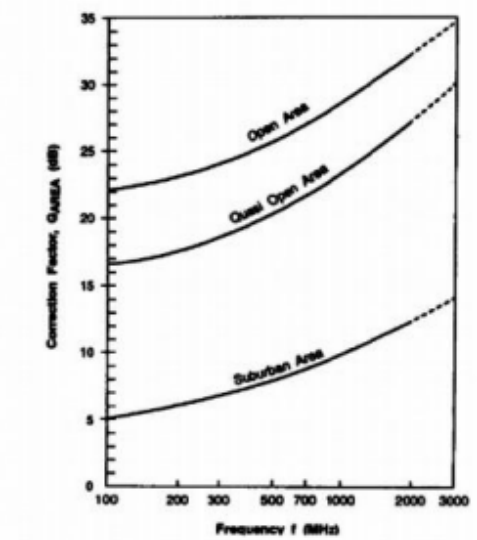
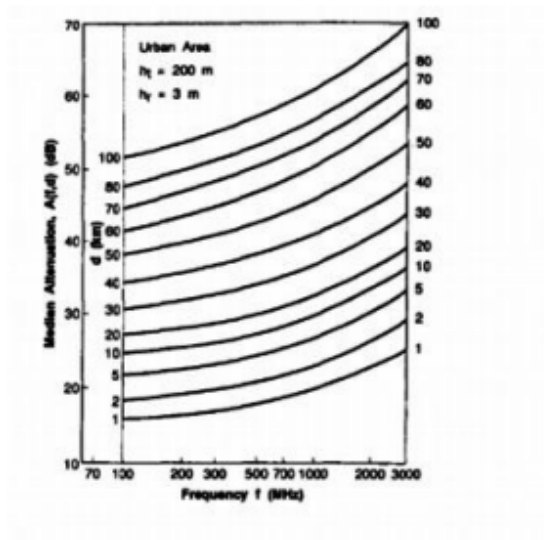
模型公式:

$$L_{50} [dB] = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} L_{50} \text{ 路径损耗的中值} \\ L_F \text{ 自由空间路径损耗} \\ A_{mu}(f, d) \text{ 衰减修正因子} \\ G(h_{te}) \text{ 基站天线高度增益因子} \\ G(h_{re}) \text{ 移动台天线高度增益因子} \\ G_{AREA} \text{ 环境增益} \end{array} \right.$$

1. 自由空间路径损耗：用 Friis 公式计算
2. 衰减修正因子 和 环境增益：查表



3. 基站天线高度增益因子：

$$G(h_{te}) [dB] = 20 \log \left( \frac{h_{te}}{200} \right) \quad (30m < h_{te} < 1000m)$$

4. 移动台天线高度增益因子：

$$G(h_{re}) [dB] = \begin{cases} 10 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) & (h_{re} \leq 3m) \\ 20 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) & (3m < h_{re} < 10m) \end{cases}$$

## 2. Hata 模型

### 1. 城市

$$L_{50}(urban) [dB] = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log d$$

$$a(h_{re})[dB] = \begin{cases} \text{中小城市} & (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \\ \text{大城市} & \begin{cases} 8.29(\log 1.54h_{re})^2 - 1.1, & f_c \leq 300MHz \\ 3.2(\log 11.75h_{re})^2 - 4.97, & f_c \geq 300MHz \end{cases} \end{cases}$$

## 2. 城镇

$$L_{50}(suburb)[dB] = L_{50}(urban) - 2 \left[ \log \left( \frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4$$

## 3. 农村

$$L_{50}(country)[dB] = L_{50}(urban) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94$$

## 4.3 阴影效应 Shadowing, SD

### 4.3.1 分布

阴影效应对接收信号的影响 简化为 零均值的对数正态分布：（精确计算非常复杂）

$$SD[dB] \sim N(0, \sigma^2)$$

### 4.3.2 相关性

一般情况下，不同接收机的阴影效应为独立同分布

当不同移动终端处于同一障碍物遮挡下，距离为d，则它们的阴影效应的方差  $\sigma$  出现相关性。

阴影效应的解相关距离：一般取值为50到100米

## 4.4 完整的大尺度衰落

（只考虑 大尺度衰落 而不考虑 小尺度衰落）

### 1. 公式推导

若只考虑大尺度衰落而不考虑小尺度衰落，则：

$$\begin{aligned} LSF[dB] &= PL(d)[dB] + SD[dB] \\ &= PL(d_0)[dB] + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) [dB] + SD[dB] \end{aligned}$$

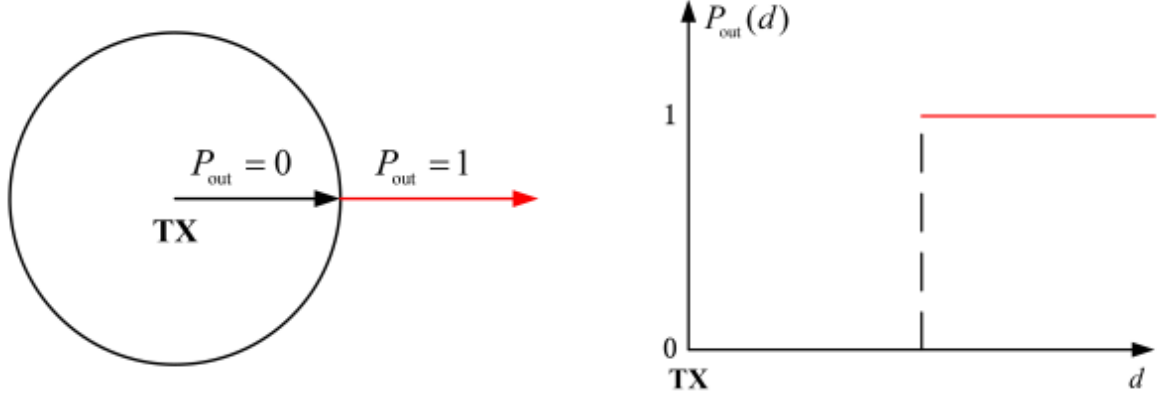
此时可知，一共有两个未知数： $n$  和  $\sigma$ ，这两个未知数通常用实际测试数据来拟合【见 例4.9 (a)(b)(c)】

## 2. 可靠性和中断率

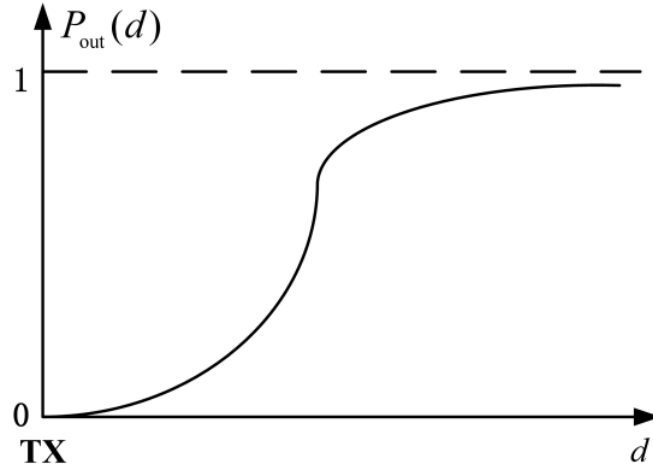
可靠性：位置  $d$  处的接收信号功率高于门限  $\gamma$  的概率  $\rho = Pr[P_r(d) > \gamma]$

中断率：位置  $d$  处的接收信号功率低于门限  $\gamma$  的概率  $P_{out} = Pr[P_r(d) < \gamma]$

**情形1：仅考虑 路径损耗（确定性）**



**情形2：考虑 路径损耗（确定性）和 阴影效应（随机性）**



$$\begin{cases} \rho = Pr[P_r(d) > \gamma] \\ P_{out} = Pr[P_r(d) < \gamma] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho = Pr\left\{P_t[dBm] - \left(PL_0 + n \times 10 \log \frac{d}{d_0}\right)[dB] + SD[dB] > \gamma[dBm]\right\} \\ P_{out} = Pr\left\{P_t[dBm] - \left(PL_0 + n \times 10 \log \frac{d}{d_0}\right)[dB] + SD[dB] < \gamma[dBm]\right\} \end{cases}$$

$$\text{设 } X = \left\{P_t - \left(PL_0 + n \times 10 \log \frac{d}{d_0}\right) + SD\right\}$$

$$\text{分析可知 } X \sim N \begin{cases} \mu = P_t - \left(PL_0 + n \times 10 \log \frac{d}{d_0}\right) \\ \sigma^2 = \sigma_{SD}^2 \end{cases}$$

对于标准正态分布，有定义 右尾函数：

$$Q(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = Pr[x > x_0]$$

$$\text{且有性质: } 1 - Q(z) = Q(-z)$$

$$\text{对于 } X \text{ 服从的正态分布, 则有 } Pr[X > x_0] = \frac{1}{\sigma_{SD}\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_{SD}^2}\right) dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma_{SD}}\right)^2\right) d\left(\frac{x-\mu}{\sigma_{SD}}\right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{x_0-\mu}{\sigma_{SD}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

$$= Q\left(\frac{x_0 - \mu}{\sigma_{SD}}\right)$$

$$\begin{cases} \rho = Pr[X > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma-\mu}{\sigma_{SD}}\right) \\ P_{out} = Pr[X \leq \gamma] = 1 - Q\left(\frac{\gamma-\mu}{\sigma_{SD}}\right) = Q\left(\frac{\mu-\gamma}{\sigma_{SD}}\right) \end{cases}$$

### 3. 衰落余量 Fading Margin, FM

$$FM = (P_t - PL) - P_{th} = P_{aver} - P_{th}$$

### 4. 有效服务区域的百分比

计算步骤:

1. 求出 路径损耗因子  $n$  和 阴影效应对数正态分布方差  $\sigma_{SD}$ , 作比值
2. 求出 区域边缘上的  $Pr[Pr(r_{\text{小区边缘}}) > P_{th}]$ , 其中  $P_{th}$  是人为预先定义的“有效服务”的接收信号功率的最低阈值
3. 查表

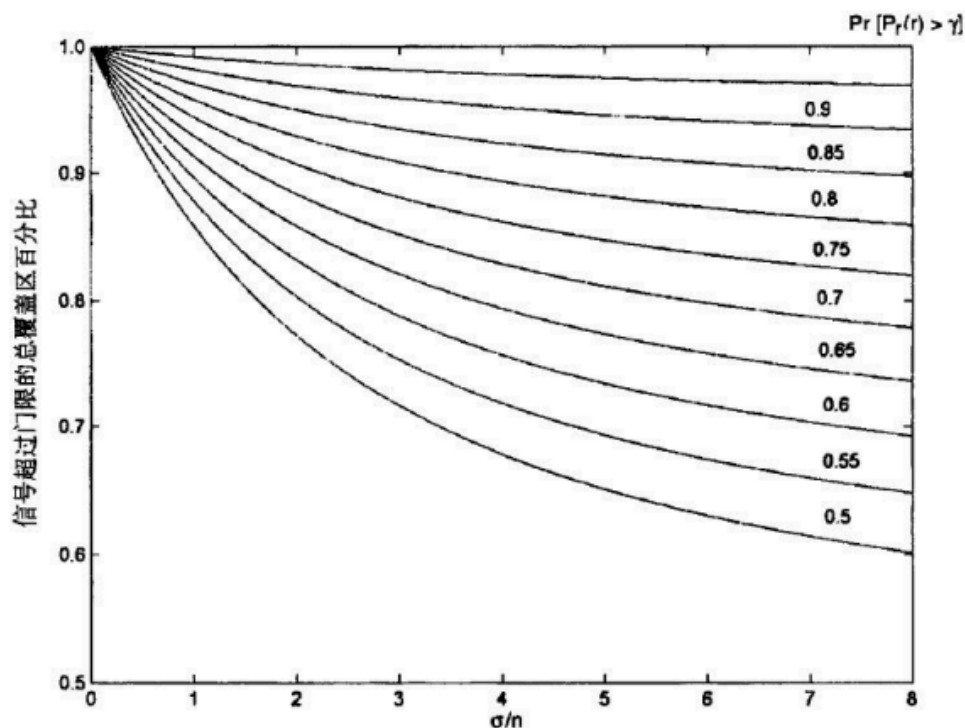


图 4.18 信号超过门限的覆盖区百分比的一族曲线， $U(\gamma)$ 为小区边界处信号超过门限的概率函数

小区中断率：

$$C = 1 - U(P_{th})$$

## 4.5 噪声系数计算（附录B）

### 4.5.1 分类

1. 热噪声：由于电子在绝对零度以上会进行随机运动导致；（高斯白噪声）
2. 闪烁噪声：也称为低频噪声， $1/f$  噪声；
3. 相位噪声：也称为相位抖动

### 4.5.2 噪声功率

1. 时域：积分（难计算）
2. 频域：

$$P_n = N_0 B = k T_0 B_0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{热噪声功率谱密度: } N_0 = k T_0 = -174 \text{ dBm/Hz} \\ \text{带宽: } B \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{玻尔兹曼常数 } k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ \text{噪声温度 } T_0 = 290 \text{ K 或 } 300 \text{ K} \end{array} \right.$$

## 4.5.3 噪声系数

### 1. 定义

$$F = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} = \frac{P_{s,in}/P_{n,in}}{P_{s,out}/P_{n,out}} = \frac{P_s/P_n}{P'_s/(P'_n + \Delta P'_n)} > 1$$

### 2. 对于 增益为G的器件

$$F = \frac{P_s/P_n}{GP_s/(GP_n + G\Delta P_n)} = \frac{P_n + \Delta P_n}{P_n} = 1 + \frac{\Delta P_n}{P_n}$$

可反解出 器件额外引入的噪声功率：

$$\Delta P_n = (F - 1)P_n = (F - 1)kT_0B$$

对于 负性负载（室温下的传输线或衰减器）

噪声系数 [dB] = 器件损耗 [dB] = 器件增益 F 取负 [dB]

$$F [dB] = L [dB] = -G [dB]$$

对于 负性元件组成的天线

可视为单位增益

$$G = 1 = 0 [dB]$$

### 3. 对于 由增益为G的器件 组成的 级联系统

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

## 4.5.4 等效噪声温度

### 1. 对于 增益为G的器件

等效噪声温度是用于衡量 器件额外引入的噪声功率 的：

$$\Delta P_n = kT_e B$$

由：

$$\begin{cases} F = 1 + \frac{\Delta P_n}{P_n} \\ P_n = kT_0 B \\ \Delta P_n = kT_e B \end{cases}$$

可得：

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

可反解出：

$$T_e = (F - 1)T_0$$

则有：

$$P_{n,out} = P'_n + \Delta P'_n = GP_n + G\Delta P_n = GkT_0B + GkT_eB = GkT_0B + Gk(F-1)T_0B = GkFT_0B$$

## 2. 对于 由增益为G的器件 组成的 级联系统

$$T_{sys} = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1G_2} + \dots$$

## 4.6 链路计算

---