

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

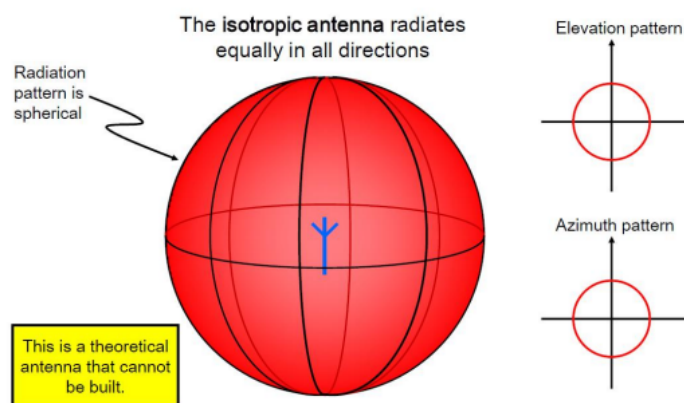
第4章 大尺度衰落 Large Scale Fading, LSF

4.1 基础知识

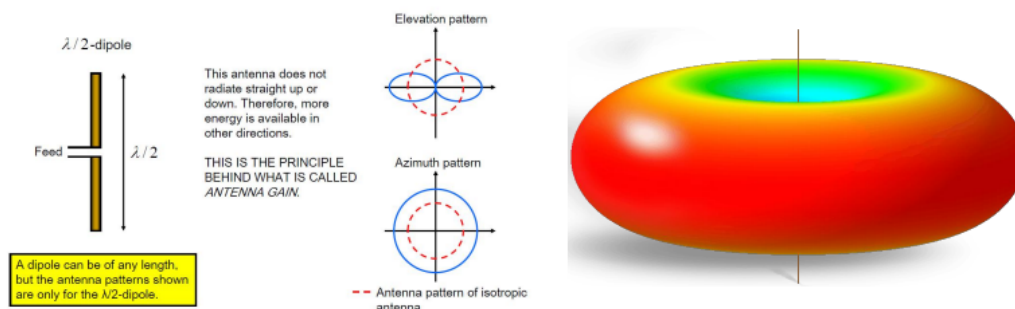
分贝 / 分贝瓦 / 分贝毫瓦

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

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

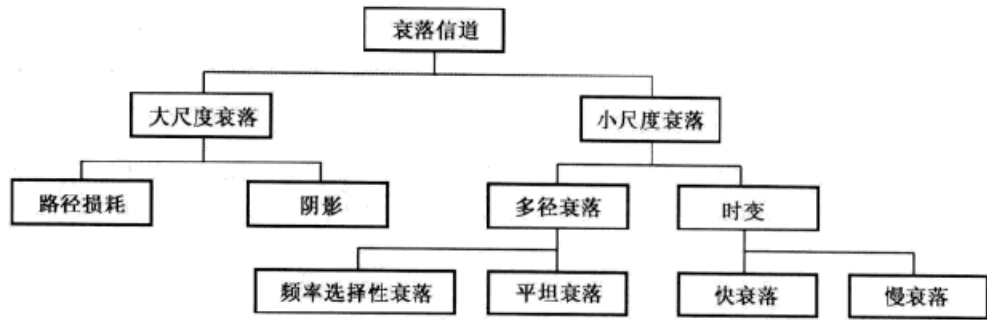


图 1.1 衰落信道的分类 <https://blog.csdn.net/ddatale>

(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；

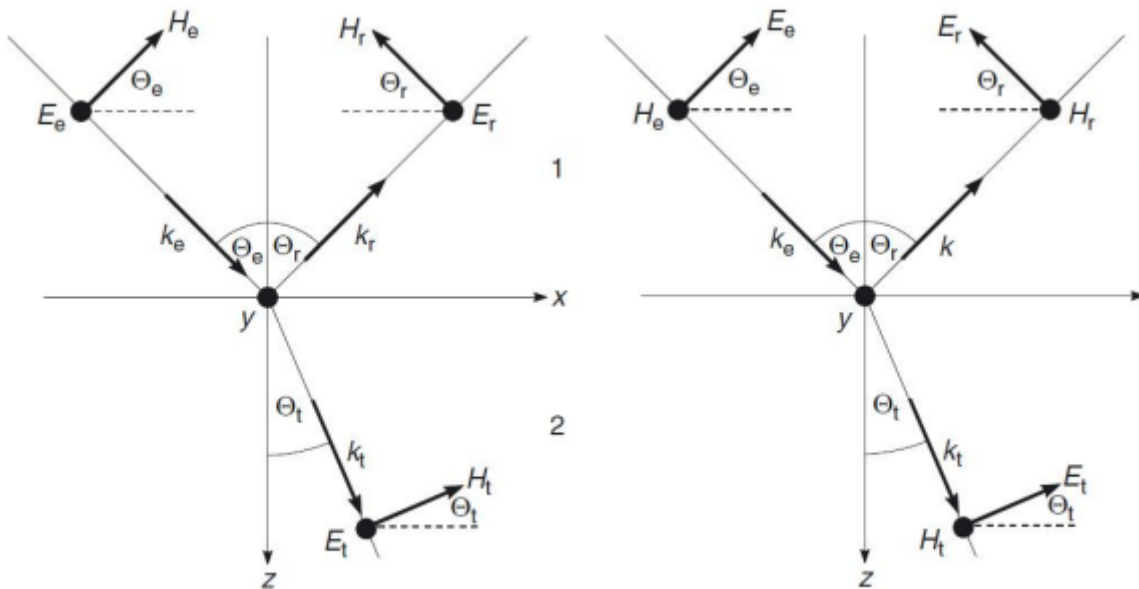


Figure 4.1 Reflection and transmission.

(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

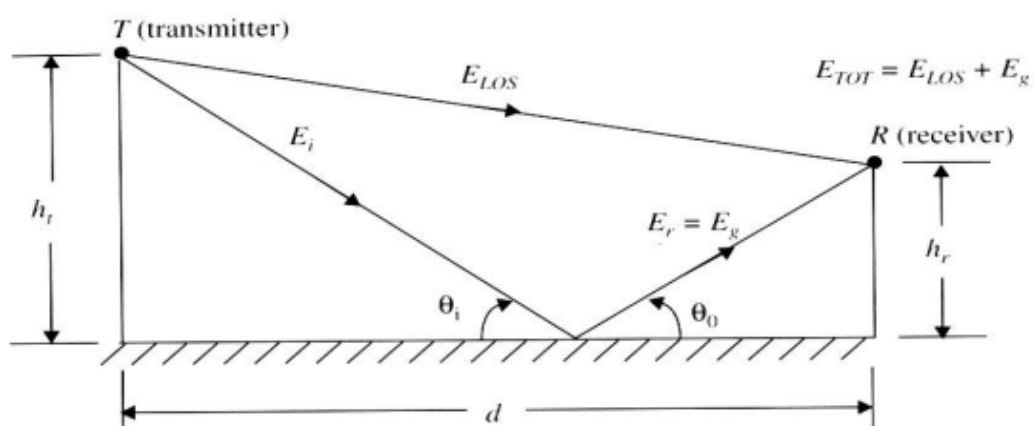


Figure 4.7 Two-ray ground reflection model.

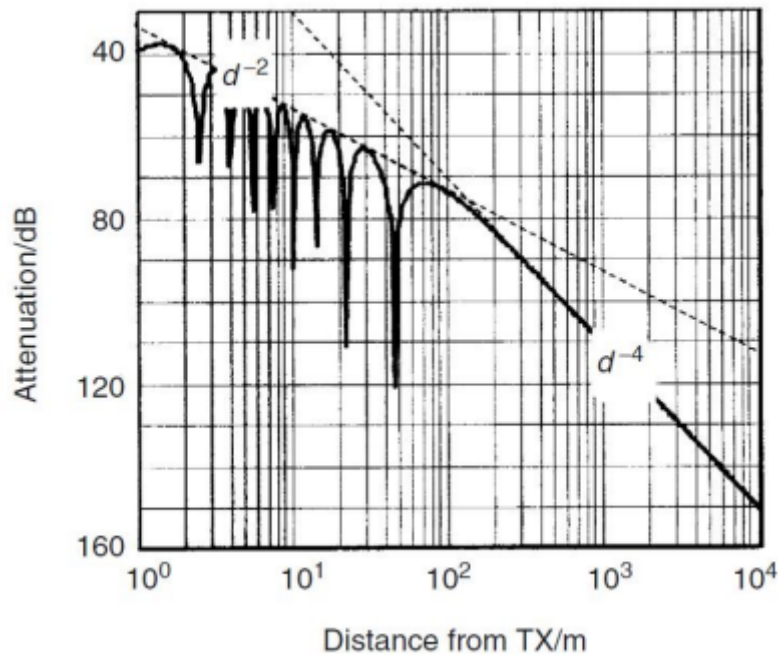
条件：

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_{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_{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

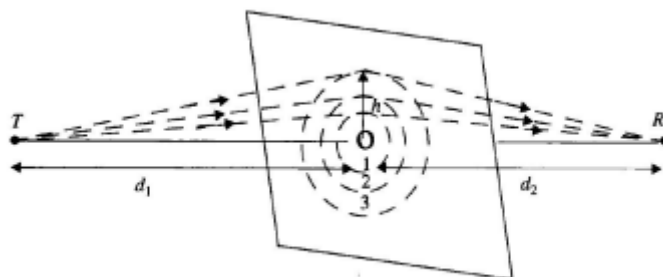


图 4.11 定义了连续费涅耳区边界的同心圆

(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： $r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$

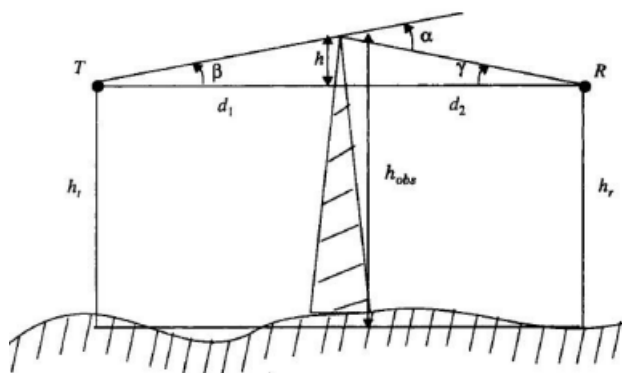
2. 当障碍物不阻挡第一费涅耳区时，绕射损失可以忽略不计

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

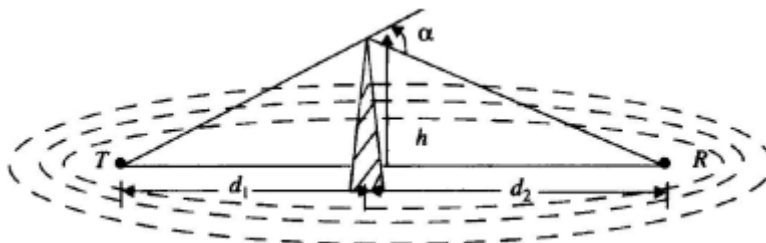
3. 费涅耳区可以用来解释路径损耗中的断点模型：随着T-R距离的增加，第一费涅耳区（椭球）也在变大。当第一费涅耳区与地面接触时，反射信号与直达波信号的相位相差 π ，此时，反射点的位置也就是断点模型中，断点所在的位置。

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：

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

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）

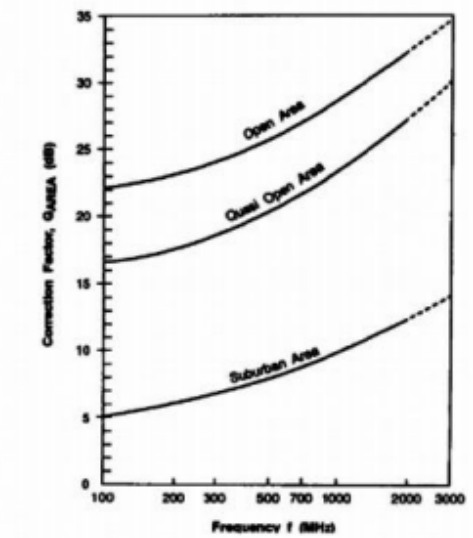
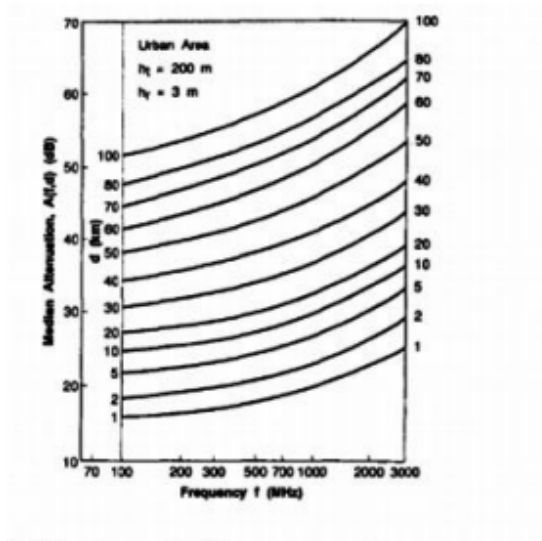
模型公式：

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

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

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 σ 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：

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

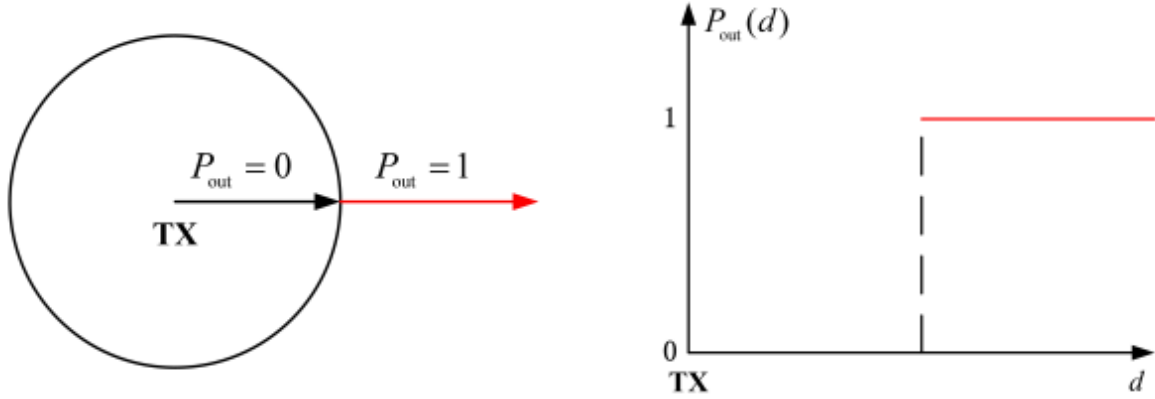
此时可知，一共有两个未知数： n 和 σ ，这两个未知数通常用实际测试数据来拟合【见 例4.9 (a)(b)(c)】

2. 可靠性和中断率

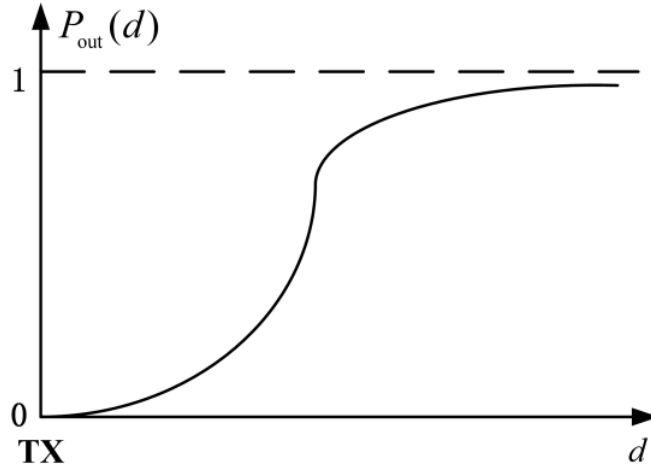
可靠性：位置 d 处的接收信号功率高于门限 γ 的概率 $\rho = Pr[P_r(d) > \gamma]$

中断率：位置 d 处的接收信号功率低于门限 γ 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 σ_{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

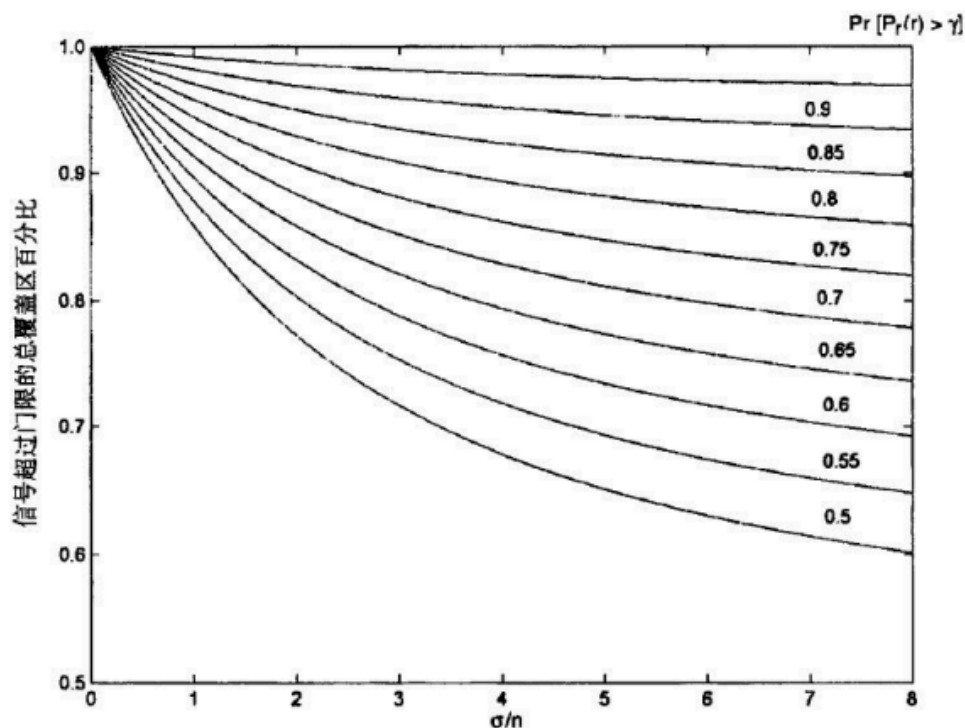


图 4.18 信号超过门限的覆盖区百分比的一族曲线, $U(\gamma)$ 为小区边界处信号超过门限的概率函数

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
