

第3章 信道技术

教学提示：无线与移动通信系统的信道是无线信道。无线信道与有线信道相比，有许多独特的性质，需要特别研究。本章主要讨论无线通信与移动通信系统中使用的各种信道技术。

教学要求：通过本章学习，应了解无线通信与移动通信系统的信道特点、传播特性、各种信道技术。应重点掌握无线信道中传播特性的估算、信道传输模型、纠错编码技术和分集接收技术。

3.1 无线信道传播特性

任何一个通信系统，信道是必不可少的组成部分。无线通信与移动系统的信道是无线信道。无线信道包括地波传播、短波电离层反射、超短波或微波视距中继、人造卫星中继、散射及移动无线电信道等。

3.1.1 信道模型

为了研究无线通信系统，首先要研究无线信道中的电波传播特性。

通常，信道的基本组成如图 3-1 所示。根据所研究问题的不同需要，可以选择不同的信道模型。

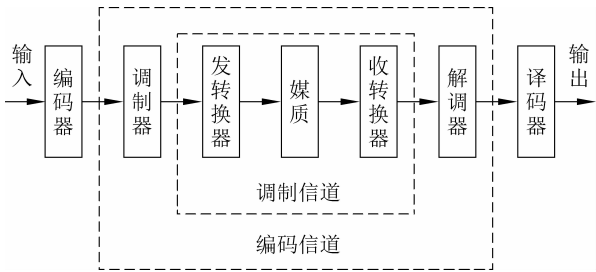


图 3-1 信道的基本组成

通信系统中常用的两种广义信道如下：

(1) 调制信道：是指图 3-1 中从调制器的输出端，到解调器的输入端的部分。包括发转换装置、媒质和收转换装置三部分。

(2) 编码信道：是指图 3-1 中从编码器输出端，到译码器输入端的部分。包括调制器、调制信道和解调器。

无线信道的传输函数，随着时间、随机快速变化，因此，是随机参量信道，简称为随参信道。

3.1.2 微波中继信道

微波的频率范围,由几百兆赫至几十吉赫。微波信号的传输特点,是在自由空间沿视距传输。

由于受地形和天线高度的限制,两点间的传输距离一般为 30~50km,当进行长距离通信时,需要在中间建立多个中继站,进行中继通信。

由于微波中继站离地面高度有限,微波中继信道中存在直接波、地面反射波、绕射波和不均匀体的散射波等。

在微波中继通信系统中,为了提高频谱利用率、减小射频波道间或邻近路由的传输信道间的干扰,需要合理设计射频波道频率配置。在一条微波中继信道上,可采用二频制、或四频制频率配置方式。

3.1.3 卫星通信信道

卫星通信,是利用人造卫星作为中继站,实现无线通信。

微波中继信道,是由地面建立的端站和中继站组成。卫星通信信道,是以卫星转发器作为中继站,与接收、发送地球站之间构成。

若卫星运行轨道在赤道平面,离地面高度为 35 780km 时,绕地球运行一周的时间恰为 24 小时,与地球自转同步,这种卫星称为静止卫星或同步卫星。不在静止轨道运行的卫星称为移动卫星。

若以静止卫星作为中继站,采用三个相差 120°的静止通信卫星,就可以覆盖地球的绝大部分地域(两极盲区除外),如图 3-2 所示。

卫星与地面站之间的信道中,微波信号经过电离层,会产生法拉第旋转,使电波的极化发生偏转。因此,在卫星通信中需要使用圆极化波信号。

3.1.4 移动通信信道

陆地移动通信工作频段主要在射频与微波频段,电波传播特点是以直射波为主。但是,由于城市建筑群和其他地形地物的影响,电波在传播过程中会产生反射波、散射波、地面波以及它们的合成波,电波传输环境较为复杂,如图 3-3 所示。

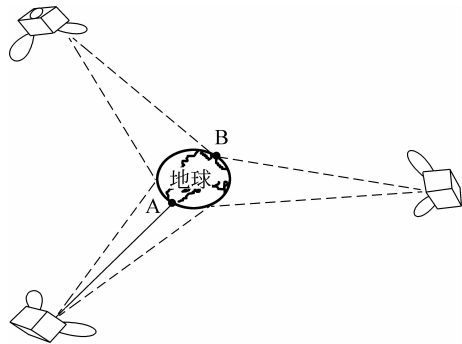


图 3-2 同步卫星通信信道

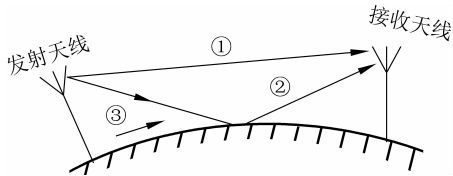


图 3-3 陆地移动通信信道

陆地移动通信信道,是指基站天线和手机天线之间的传播路径。

从图 3-3 可以看出,在陆地移动通信信道中,包括以下三种波:

- ① 直接波。
- ② 反射波。
- ③ 地面波。

移动信道是典型的随参信道。

3.1.5 短波电离层反射信道

短波电离层反射信道,是利用地面发射的无线电波在电离层,或电离层与地面之间的一次反射或多次反射所形成的信道。

由于太阳辐射的紫外线和 X 射线,使离地面 60~600km 的大气层成为电离层。电离层是由分子、原子、离子及自由电子组成。

电离层特性具有以下变化周期特点:

- (1) 昼夜变化。
- (2) 季节变化。
- (3) 太阳黑子变化。

由于太阳辐射的变化,电离层的密度和厚度也随时间随机变化,因此,短波电离层反射信道也是随参信道。

由于电离层密度和厚度随时间随机变化,因此,短波电波满足反射条件的频率范围也随时间变化。

短波电离层反射信道最主要的特征是多径传播,如图 3-4 所示。

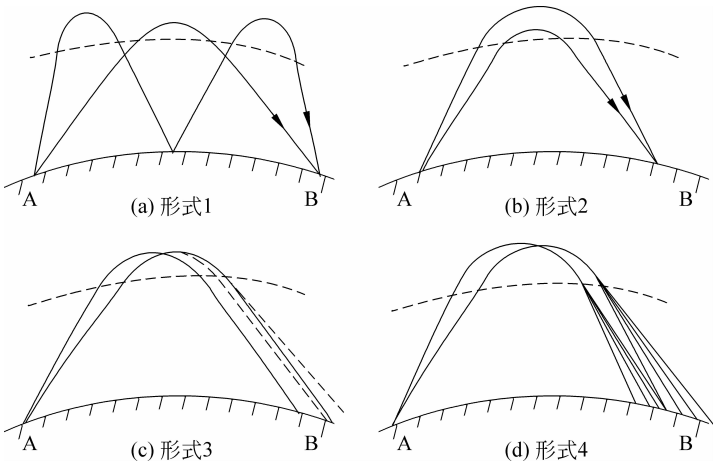


图 3-4 各种形式的多径传播

3.2 无线信道特征

无线信道与移动通信信道的基本特征,是衰落特性。

3.2.1 信号传播方式

无线信道与移动通信信道中,无线电波传播的方式是:直射波、反射波、绕射波、散射波以及它们的合成波。

对于地面移动信道,由于近地环境的影响,所以,无线电波的合成波是随机起伏变化的。

对于卫星信道,由于电离层特性参数的随机变化,电离层波传播的信号也是随机起伏变化的。

图 3-5 为典型信号的衰落特性。

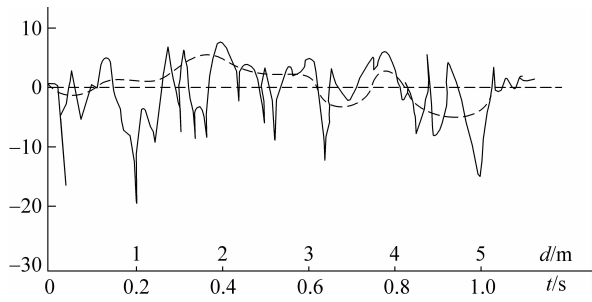


图 3-5 典型信号的衰落特性

【例 3-1】 电离层为等离子体,电子质量为 m 、电荷为 q 。当外加直流磁场 $B=\hat{z}B_0$ 时,回旋频率

$$\omega_c = \frac{qB_0}{m} \tag{3-1}$$

等离子体频率

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{m\epsilon_0}} \tag{3-2}$$

这时,电离层的介电常数张量为

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon' & i\epsilon_g & 0 \\ -i\epsilon_g & \epsilon' & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \tag{3-3}$$

其中,本构参数为

$$\epsilon' = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2} \right) \tag{3-4}$$

$$\epsilon_g = -\epsilon_0 \frac{\omega_c \omega_p^2}{\omega(\omega^2 - \omega_c^2)} \tag{3-5}$$

$$\epsilon_z = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \tag{3-6}$$

求外加磁场为无限强时,电离层的介电常数张量。

解: 当外加磁场为无限强时, $B_0 \rightarrow \infty$, 则

$$\omega_c = \frac{qB_0}{m} \rightarrow \infty \tag{3-7}$$

因此

$$\epsilon' = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2} \right) = \epsilon_0 \quad (3-8)$$

$$\epsilon_g = -\epsilon_0 \frac{\omega_c \omega_p^2}{\omega(\omega^2 - \omega_c^2)} = 0 \quad (3-9)$$

$$\epsilon_z = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (3-10)$$

介电常数张量为

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon' & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon' & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

这时,电离层为单轴等离子体。

3.2.2 信号的衰落

在陆上移动通信中,通常移动台的天线高度仅超出地面 1~4m,电波传播受地形地物的影响较大。与固定通信相比,移动通信的电波传播显得更为复杂。

移动小区基站天线与移动用户手机之间,存在着以下波:

- (1) 直接波;
- (2) 反射波;
- (3) 散射波;
- (4) 绕射波;
- (5) 地面波。

上述各种波及其合成波的起伏,会引起接收机信号的衰落。

衰落的主要形式有:

- (1) 传播损耗和弥散;
- (2) 阴影衰落;
- (3) 多径衰落;
- (4) 多普勒频移等。

多径衰落的信号包络服从瑞利分布,故把这种多径衰落称为瑞利衰落,瑞利衰落的概率分布,如图 3-6 所示。

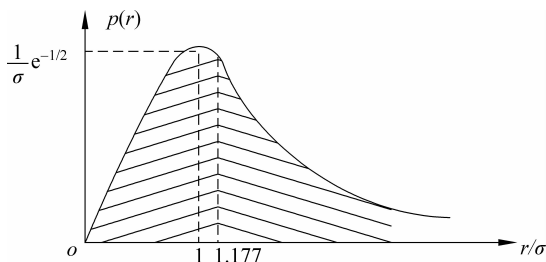


图 3-6 瑞利衰落的概率分布

3.2.3 衰落的分类

根据不同距离内信号强度变化的快慢,衰落可以分为:

- (1) 大尺度衰落;
- (2) 小尺度衰落。

大尺度衰落,表现为长距离上信号强度的缓慢变化,主要是由信道路径上固定障碍物的阴影引起的,它会影响通信系统的业务覆盖区域。

小尺度衰落,表现为短距离上信号强度的快速波动,主要是由移动台运动和地点的变化引起的,它会影响通信信号传输质量。

根据信号与信道变化快慢程度的比较,衰落可以分为:

- (1) 长期慢衰落;
- (2) 短期快衰落。

为了保证通信畅通,系统必须有一定的衰落储备量。图 3-7 为可通率 T 分别为 90%、95% 和 99% 时的三组曲线。

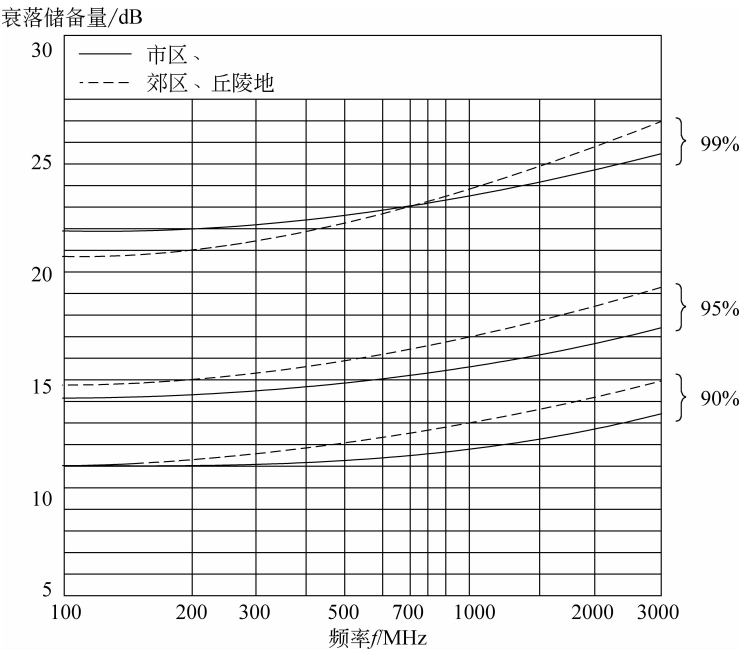


图 3-7 不同系统的衰落储备量

在应用中,可以根据地形地物、工作频率和可通率要求,由此图可查得必须的衰落储备量。

【例 3-2】 地面无线通信系统的工作频率 $f=450\text{MHz}$, 工作环境为市区, 要求可通率 $T=99\%$, 求: 系统必需的衰落储备。

解: 由图 3-7, 可查得, 此时必须的衰落储备约为 22.5dB。

3.2.4 衰落的仿真分析

信号的衰落会降低系统通信质量。为了具体了解衰落的影响,我们对数字无线通信系统误码率进行仿真分析。

数字通信系统的主要性能指标有:

- (1) 有效性。
- (2) 可靠性。
- (3) 安全性。

可靠性的衡量指标是误码率。误码率定义为:错误接收码元数目在传输码元总数中所占的比例。误比特率为:错误接收比特数目在传输比特总数中所占的比例。

在二进制数字调制中,调制与解调方式会影响系统的误码性能。在正交幅度调制(QAM)中,可以使用 MATLAB 仿真程序进行误比特率分析:

```
clear;                                %仿真 QAM 的误比特率
snr=1:1:11;                            %计算理论误比特率
sn1=12 * 10.^(snr/10)/(16-1);
err_the=(1-(1-(2*(1-1/sqrt(16)))*1/2*erfc(1/sqrt(2)*sqrt(sn1))))).^2)/4;
                                %用理论值决定仿真点数
N=floor(1./err_the)*100+100;
N(find(N<5000))=5000;                %仿真开始
P=0.5;                                %产生 1 的概率
For i=1:length(N);                    %产生随机二进制序列
    Sou=randsrc(1,N(i),[1,0;p,1-p]);
                                %对产生序列进行 QAM 调制
    [sou1,sou2]=Qam_modulation(sou);  %插值
    sig_ins1=insert_value(sou1,8);
    sig_ins2=insert_value(sou2,8);
    [sou1,sou2]=rise_cos(sig_ins1,sig_ins2,0.25,2);
                                %滤波后的信号加入白噪声
    [x1,x2]=generate_noise(sou1,sou2,snr(i));
    sig_noi1=x1;
    sig_noi2=x2;
    [sig_noi1,sig_noi2]=rise_cos(sig_noi1,sig_noi2,0.25,2);
    [x1,x2]=pick_sig(sig_noi1,sig_noi2,8);
    sig_noi1=x1;
    sig_noi2=x2;                    %解调
    sig=demodulate_sig(sig_noi1,sig_noi2);
                                %计算误比特率
    err_bit(i)=length(find(sig_sou)~=0)/N(i);
end;                                %画图
semilogy(snr,err_bit,'- * b');
hold on
semilogy(snr,err_the,'-+ r');
grid on
```

legenth('实际值','理论值','location','NorthEast');

其中,QAM 调制函数 Qam_modulation 与解调函数 demodulate_sig,可以参考章坚武等编写的《移动通信实验与实训》(西安电子科技大学出版社,2011)。

3.3 无线信道传输模型

在无线通信系统分析中,为了有效研究无线信道中的信道传输,需要建立不同无线信道的传输模型。

3.3.1 自由空间模型

在自由空间中,直射波传播在传播路径中没有阻挡,所以电波能量不会被障碍物吸收,也不会产生反射和折射。

自由空间的电波传播损耗为

$$L_{fs} = 32.45 + 20\lg d + 20\lg f \quad (\text{dB}) \tag{3-12}$$

其中, d 为信号传输距离(km), f 为系统工作频率(MHz)。图 3-8 给出了无线信道中自由空间传播损耗与频率和距离的关系。

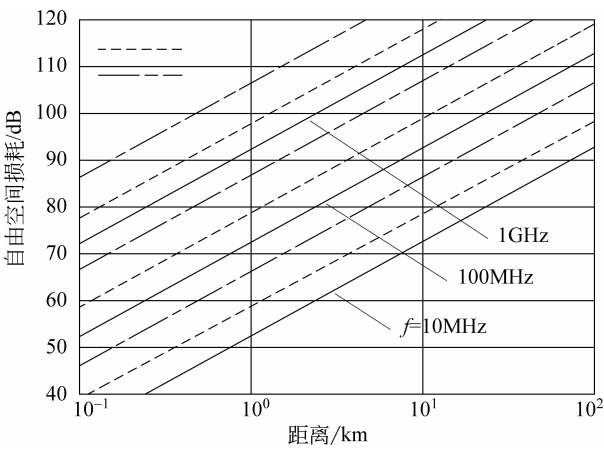


图 3-8 自由空间传播损耗与频率与距离的关系

【例 3-3】 在自由空间模型中,求:

- (1) 通信系统的工作频率提高一倍,电波的传播损耗增加多少?
- (2) 通信系统的工作波长减少一半,电波的传播损耗增加多少?
- (3) 信号的传播距离增加一倍,电波的传播损耗增加多少?

解: 由于自由空间的电波传播损耗 $L_{fs} = 32.45 + 20\lg d + 20\lg f \quad (\text{dB})$, 则

- (1) 通信系统的工作频率提高一倍,电波的传播损耗增加 6dB。
- (2) 通信系统的工作波长减少一半,电波的传播损耗增加 6dB。
- (3) 信号的传播距离增加一倍,电波的传播损耗增加 6dB。

3.3.2 常用传播模型

1. Egli John J. 模型

Egli John J. 模型认为不平坦地区的场强,等于平面大地反射公式算出的场强加上一个修正值。

在使用中,可以分为以下三步:

- (1) 计算平面大地反射场强。
- (2) 计算修正值。
- (3) 将上述结果相加即可。

2. 奥村模型

奥村(Okumura)模型将无线信道进行分类:

- (1) 城市;
- (2) 郊区。

将城市看做是准平滑地形,给出城市场强中值。

对于郊区等不规则地形,进行修正。

奥村模型适用的范围:

- (1) 频率为 150~1500MHz。
- (2) 基站天线高度为 30~200m。
- (3) 移动台天线高度为 1~10m。
- (4) 传播距离为 1~20km。

3. Hata 模型

Hata 模型是对奥村模型的公式化处理,以方便使用。

在使用奥村模型时,需要查图表曲线,比较麻烦。为了简便,Hata 对 Okumura 提出的基本中值场强曲线,进行了公式化处理,使预测方法能采用计算机进行预测,模型各自适用范围不同,计算路径损耗的方法和需要的参数也不相同。在选择模型时,需要考虑以下因素:

- (1) 不同预测点位置;
- (2) 从发射机到预测点的地形地物特征;
- (3) 建筑物高度和分布密度;
- (4) 街道宽度和方向差异等。

如果传播模型选取不当,使用不合理,将影响路径损耗预测的准确性,并影响链路预算、干扰计算、覆盖分析和容量分析。

3.4 无线信道传输损耗

在无线信道的传输损耗计算中,通常先计算出自由空间的基本损耗,然后加上其他情况引起的损耗。

3.4.1 视距传播的极限距离

由于地球曲率的限制,地面视距传播的距离有限,如图 3-9 所示。

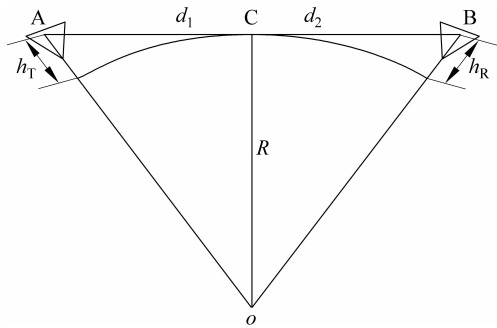


图 3-9 地面视距传播的极限距离

已知地球半径为 $R=6370\text{km}$, 设发射天线和接收天线高度分别为 h_R 和 h_T (单位为 m), 理论上可得视距传播的极限距离为

$$d_0 = 3.57(\sqrt{h_R(m)} + \sqrt{h_T(m)}) (\text{km}) \tag{3-13}$$

考虑空气的不均匀性对电波传播轨迹的影响, 在标准大气折射情况下, 等效地球半径为 $R=8500\text{km}$, 所以, 修正后的视距传播的极限距离为

$$d_0 = 4.12(\sqrt{h_R(m)} + \sqrt{h_T(m)}) (\text{km}) \tag{3-14}$$

【例 3-4】 假设: 一个地面微波中继通信系统, 其收发天线高度都是 16m 。求这个微波通信系统的最大中继距离。

解: 将 $h_R=h_T=16\text{m}$ 代入式(3-14), 得

$$d_0 = 4.12 \times (4 + 4) = 32.96 (\text{km}) \tag{3-15}$$

3.4.2 障碍物的绕射

由于地面移动信道会遇到各种障碍物, 根据菲涅尔绕射理论, 障碍物引起的绕射损耗与菲涅尔余隙之间的关系如图 3-10 所示。

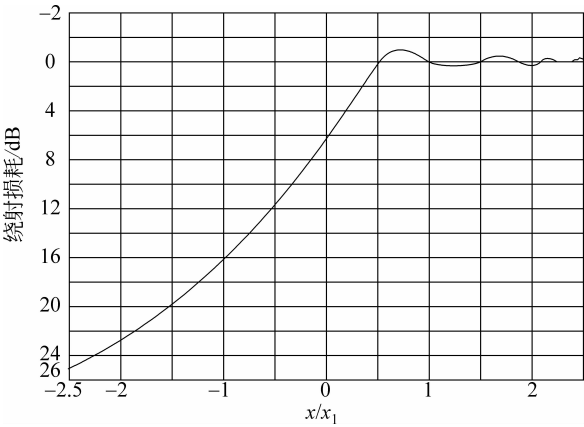


图 3-10 绕射损耗与菲涅尔余隙的关系

图中,横坐标为 x/x_1 , x_1 为非涅尔半径(第一菲涅尔半径)。

【例 3-5】 假设: 一个无线通信系统的工作频率为 $f=150\text{MHz}$,收发距离 $L=15\text{km}$ 在地面无线信道中,菲涅尔余隙 $x=-82\text{m}$,发射天线距离障碍物 $d_1=5\text{km}$,接收天线距离障碍物 $d_2=10\text{km}$ 。求: 电波传播损耗。

解: 电波传播损耗有两部分: 一是自由空间损耗,二是绕射损耗。

(1) 自由空间损耗:

$$L_{\text{bs}} = 32.45 + 20\lg 15 + 20\lg 150 = 99.5(\text{dB}) \tag{3-16}$$

(2) 绕射损耗: 由工作频率为 $f=150\text{MHz}$,得,工作波长

$$\lambda = 2\text{m}$$

第一菲涅尔半径

$$x_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = 81.7\text{m} \tag{3-17}$$

则

$$\frac{x}{x_1} = -1 \tag{3-18}$$

查图 3-10,得附加损耗为 17dB 。所以,总的传播损耗为

$$99.5 + 17 = 116.5\text{dB}$$

3.4.3 传播损耗的计算

对于不同情况,奥村模型的计算方法不同。

1. 城市准平滑地形

图 3-11 给出了城市准平滑地形的基本损耗中值 $A_m(f, d)$ 与工作频率、通信距离的关系。

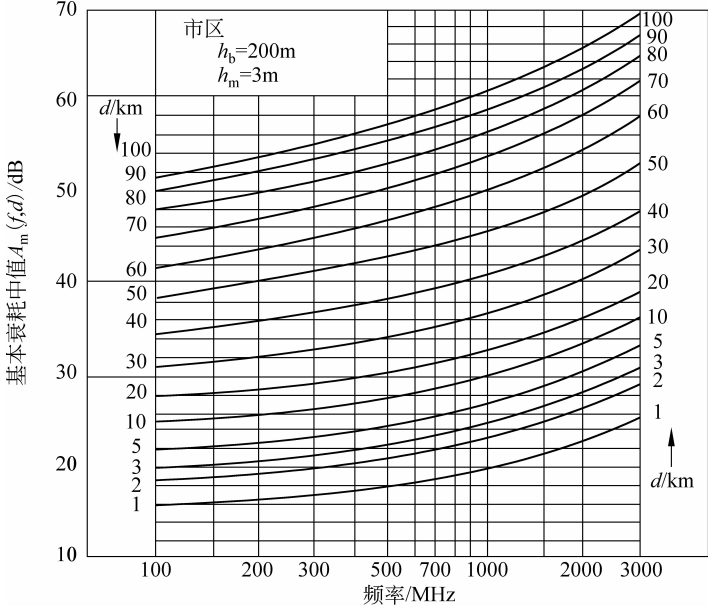


图 3-11 城市准平滑地形基本损耗中值

图 3-11 中给出的,是在基站天线有效高度 $h_b=200\text{m}$,移动台天线高度 $h_m=3\text{m}$,以自由空间传播衰耗为基准(0dB),求得的衰耗中值的修正值 $A_m(f,d)$ 。

在应用中,传播损耗的计算步骤如下:

- (1) 计算自由空间的传播衰耗中值。
- (2) 查图求城市准平滑地形基本衰耗中值。
- (3) 进行修正。

【例 3-6】 某地面无线通信系统, $d=10\text{km}$, $h_b=200\text{m}$, $h_m=3\text{m}$, $f=900\text{MHz}$,求其在城市街道地区准平滑地形的传播衰耗中值。

解: 自由空间的传播衰耗中值为

$$L_{bs} = 32.45 + 20\lg d + 20\lg f = 32.45 + 20\lg 10 + 20\lg 900 = 111.5(\text{dB}) \quad (3-19)$$

查图 3-11,得

$$A_m(f,d) = A_m(900,10) = 30(\text{dB}) \quad (3-20)$$

则,城市街道地区准平滑地形的传播衰耗中值为

$$L_T = L_{bs} + A_m(f,d) = 111.5 + 30 = 141.5(\text{dB}) \quad (3-21)$$

当系统基站天线、移动台天线与图 3-11 中所给参数不同时,需要进行修正。图 3-12 为基站天线高度增益因子曲线。

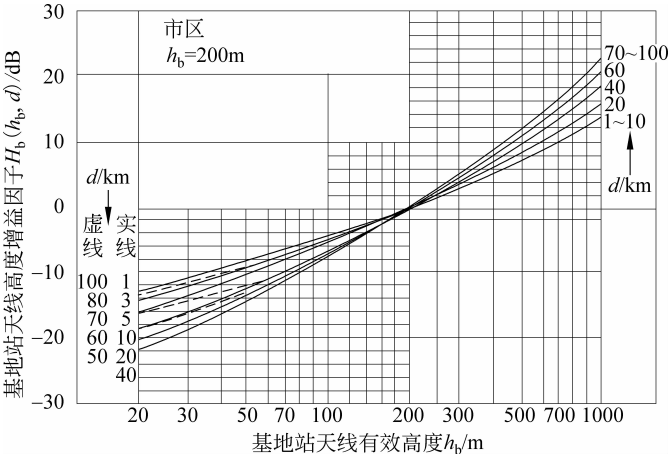


图 3-12 基站天线高度增益因子曲线

图 3-13 为移动台天线高度增益因子曲线。

【例 3-7】 某地面无线通信系统, $d=10\text{km}$, $f=900\text{MHz}$, $h_b=50\text{m}$, $h_m=2\text{m}$,求路径传播衰耗中值。

解: 查图 3-12 得

$$H_b(h_b,d) = H_b(50,10) = -12(\text{dB}) \quad (3-22)$$

查图 3-13 得

$$H_m(h_m,f) = H_m(2,900) = 2(\text{dB}) \quad (3-23)$$

由上例,修正后的路径衰耗中值为

$$\begin{aligned} L_T &= L_{bs} + A_m(f,d) - H_b(h_b,d) - H_m(h_m,f) \\ &= 141.5 - H_b(50,10) - H_m(2,900) \\ &= 141.5 - (-12) - (-2) = 155.5(\text{dB}) \end{aligned} \quad (3-24)$$

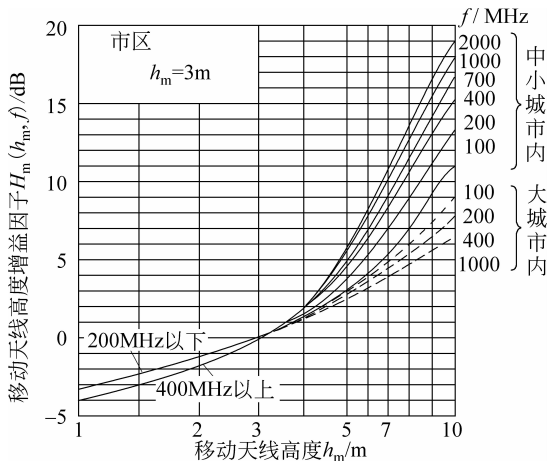


图 3-13 移动台天线高度增益因子曲线

【例 3-8】 某一移动电话系统,工作频率为 450MHz,基站天线高度为 70m,移动台天线高度为 1.5m,在市区工作,传播路径为准平滑地形,通信距离为 20km,求传播路径的衰耗中值。

解:

(1) 自由空间传输损耗:

$$\begin{aligned} L_{bs} &= 32.45 + 20\lg d(\text{km}) + 20\lg f(\text{MHz}) \\ &= 32.45 + 20\lg 20(\text{km}) + 20\lg 450(\text{MHz}) \\ &= 111.5\text{dB} \end{aligned} \quad (3-25)$$

(2) 市区准平滑地形的衰耗中值:

查图 3-11,得

$$A_m(f, d) = A_m(450, 20) = 30.5\text{dB} \quad (3-26)$$

查图 3-12 得

$$H_b(h_b, d) = H_b(70, 20) = -10\text{dB} \quad (3-27)$$

查图 3-13 得

$$H_m(h_m, f) = H_m(1.5, 450) = -3\text{dB} \quad (3-28)$$

所以,准平滑地形市区路径衰耗中值为

$$\begin{aligned} L_T &= L_{bs} + A_m(f, d) - H_b(h_b, d) - H_m(h_m, f) \\ &= 111.5 + 30.5 - (-10) - (-3) \\ &= 155\text{dB} \end{aligned} \quad (3-29)$$

2. 郊区修正

当无线系统在其他区域工作时,还需要考虑其他修正。图 3-14 给出了郊区修正因子曲线。

图 3-15 给出了斜坡地形修正因子曲线。

【例 3-9】 某一移动电话系统,工作频率为 450MHz,基站天线高度为 70m,移动台天线高度为 1.5m,通信距离为 20km,在郊区工作,传播路径是正斜坡,且 $\theta_m = 15\text{mrad}$ (毫弧度),求:传播路径的衰耗中值。

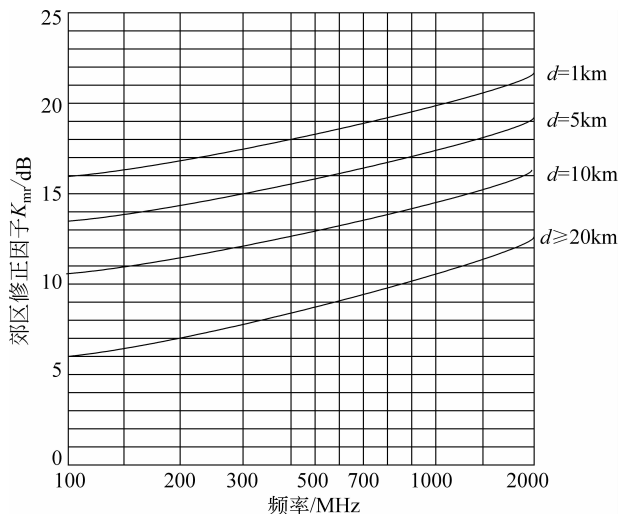


图 3-14 郊区修正因子曲线

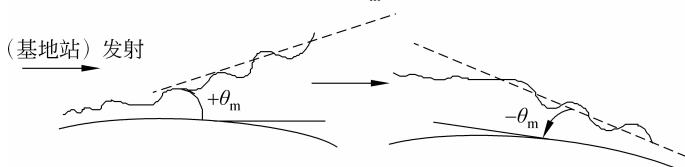
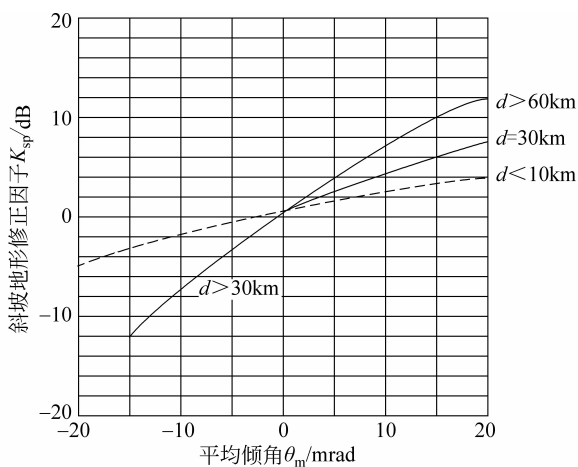


图 3-15 斜坡地形修正因子曲线

解：由例 3-8，准平滑地形市区路径衰耗中值为 $L_T=155\text{dB}$ ，郊区修正，查图 3-14，得

$$K_{mr} = 8.5\text{dB}$$

斜坡路径修正，查图 3-15，得

$$K_{sp} = 4.5\text{dB}$$

所以，地形地物修正因子为

$$K_r = K_{mr} + K_{sp} = 13\text{dB}$$

因此，郊区斜坡路径衰耗中值为

$$L_A = L_T - K_r = 155 - 13 = 142(\text{dB}) \quad (3-30)$$

【例 3-10】 某一移动信道,工作频段为 450MHz,基站天线高度为 50m,天线增益为 6dB,移动台天线高度为 3m,天线增益为 0dB;在市区工作,传播路径为中等起伏地,通信距离为 10km。试求:

(1) 传播路径损耗中值。

(2) 若基站发射机送至天线的信号功率为 10W,求移动台天线得到的信号功率中值。

解:

(1) 自由空间传播损耗

$$\begin{aligned} [L_{fs}] &= 32.44 + 20\lg f + 20\lg d \\ &= 32.44 + 20\lg 450 + 20\lg 10 \\ &= 105.5\text{dB} \end{aligned} \quad (3-31)$$

查图 3-11,得市区基本损耗中值

$$A_m(f, d) = A_m(450, 10) = 27\text{dB}$$

查图 3-12 得

$$H_b(h_b, d) = H_b(50, 10) = -12\text{dB}$$

查图 3-13 得

$$H_m(h_m, f) = H_m(3, 450) = 0\text{dB}$$

所以

$$L_A = L_T = 105.5 + 27 + 12 = 144.5(\text{dB})$$

(2) 中等起伏地市区中接收信号的功率中值

$$\begin{aligned} [P_P] &= [P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_b G_m] - A_m(f, d) + H_b(h_b, d) + H_m(h_m, f) \\ &= [P_T] - [L_{fs}] + [G_b] + [G_m] - A_m(f, d) + H_b(h_b, d) + H_m(h_m, f) \\ &= [P_T] + [G_b] + [G_m] - [L_T] \\ &= 10\lg 10 + 6 + 0 - 144.5 \\ &= -128.5\text{dBW} = -98.5\text{dBm} \end{aligned} \quad (3-32)$$

【例 3-11】 若上题改为郊区工作,传播路径是正斜坡,且 $\theta_m = 15\text{mrad}$,其他条件不变。再求传播路径损耗中值及接收信号功率中值。

解: 因

$$K_T = K_{mr} + K_{sp}$$

查图 3-14,有

$$K_{mr} = 12.5\text{dB}$$

查图 3-15,有

$$K_{sp} = 3\text{dB}$$

故

$$L_A = L_T - K_T = L_T - (K_{mr} + K_{sp}) = 144.5 - 15.5 = 129\text{dB}$$

所以,

$$\begin{aligned}
 [P_{\text{PC}}] &= [P_{\text{T}}] + [G_{\text{b}}] + [G_{\text{m}}] - L_{\text{A}} \\
 &= 10 + 6 - 129 = -113\text{dBW} \\
 &= -83\text{dBm}
 \end{aligned}$$

或

$$[P_{\text{PC}}] = [P_{\text{P}}] + K_{\text{T}} = -98.5\text{dBm} + 15.5\text{dB} = -83\text{dBm} \quad (3-33)$$

【例 3-12】 什么是电波传播的主要通道？它对电波传播有什么影响？

解：虽然电波传播中的许多菲涅尔区都对接收点的场强有影响，但第一菲涅尔区起主要作用，因此第一菲涅尔椭圆是电波传播的主要通道。它对电波的传播有两方面的影响：

(1) 只要有凸起物进入第一菲涅尔椭圆，就不能将两点之间的电波传播视为自由空间传播。

(2) 即使有凸起物挡住了收发两点之间的视线，只要没有将第一菲涅尔椭圆全部遮住，就能够在接收点收到信号，即电波传播表现出绕射作用。

3.5 信道编码技术

为了使无线通信与移动通信系统的信号便于在信道中传播，提高通信的有效性、可靠性、安全性，需要使用不同的编码技术。

3.5.1 扩频码和地址码

1. 扩频码和地址码的概念

扩频码是系统扩频使用的码，地址码是用来作为地址的码。

常用的扩频码和地址码有：

- (1) 伪随机(PN)码；
- (2) 沃尔什(Walsh)码；
- (3) 正交可变速率扩频增益码。

2. 伪随机码

伪随机码，又称为伪噪声码，是一种具有白噪声性质的码。常用的伪随机码：

- (1) m(序列)码

m 序列，是一种伪随机序列，是由 n 级移位寄存器所能产生的周期最长的序列，又称最大长度序列。m 序列的自相关函数如图 3-16 所示。

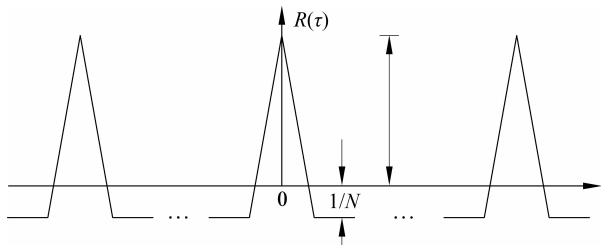


图 3-16 m 序列的自相关函数

m 码的功率谱密度如图 3-17 所示。

m 序列的自相关函数,是理想的双值函数。而 m 序列的互相关函数,是指长度相同而序列结构不同的两个 m 序列之间的相关函数。

m 序列可以使用生成多项式生成如下 MATLAB 程序:

```
Clear;
Clc;
G=63; %码长
Sd1=[0 0 0 0 1]; %寄存器初始状态
PN1=[]; %第一个序列
for j=1:G
    PN1=[PN1 sd1(5)];
    if sd1(1)==sd1(4)
        temp1=0;
    else temp1=1;
    end
    sd1(1)=sd1(2);
    sd1(2)=sd1(3);
    sd1(3)=sd1(4);
    sd1(4)=sd1(5);
    sd1(5)=temp1;
end
subplot(3,1,1);
stem(PN1);
title('(45)8=(100101)2 产生的 m 序列');
```

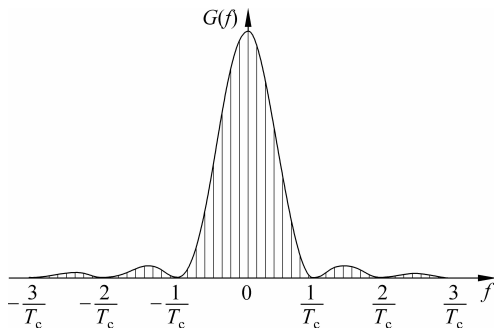


图 3-17 m 码的功率谱密度

(2) Gold 码

Gold 序列是一类伪随机序列,它具有良好的自相关和互相关特性,可以用作地址码的数量远大于 m 序列,而且易于实现,结构简单,在工程中得到广泛的应用。

Gold 码的生成: 给定移位寄存器级数 n 时,总可以找出一对互相关函数最小的码序列,采用移位相加的方法构成新码组,其互相关旁瓣都很小,而且自相关函数和互相关函数都是有界的,这个新码组被称为 Gold 码或 Gold 序列。

级数为 7,长度为 127 的平衡 Gold 序列,可以由 m1 序列和 m2 序列模二相加产生。MATLAB 程序如下:

```
function c=gold();
n=7; %m1 序列多项式 (211)8=(010001001)2
a=[1 1 1 1 1 1 1]; %m1 序列各移位寄存器的初值
co=[];
for v=1:2^n-1
    co=[co,a(1)];
```

```

a(8)=mod(a(5)+a(1),2);
a(1)=a(2);
a(2)=a(3);
a(3)=a(4);
a(4)=a(5);
a(5)=a(6);
a(6)=a(7);
a(7)=a(8);
end
m1=co;
    %m2 的多项式为 (217)8= (010001111)2
    %本原多项式为 (211)8、(217)8 的两个 m 序列为一优选对,相加构成 Gold 序列
b=[1 0 1 0 0 0 0 1];          %m2 序列各移位寄存器的初值
co=[];
for v=1:2^n-1
    co=[co,b(1)];
    m=mod(b(5)+b(1),2);
    p=mod(b(6)+m,2);
    b(8)=mod(b(7)+p,2);
    b(1)=b(2);
    b(2)=b(3);
    b(3)=b(4);
    b(4)=b(5);
    b(5)=b(6);
    b(6)=b(7);
    b(7)=b(8);
end
m2=co;
c=xor(m1,m2);

```

(3) Walsh 码

如果,序列间的互相关函数值很小,特别是正交序列的互相关函数为 0,那么,这类序列称为第二类伪随机序列。Walsh 序列是第二类伪随机序列。

Walsh 函数是有限区间上的一组归一化正交函数集,可由哈达玛矩阵产生。

哈达玛矩阵 $\mathbf{H}$ 是由 +1 和 -1 两个元素组成的正交方阵。所谓正交方阵是指任意两行(或两列)都是相互正交的。

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

$$\mathbf{H}_8 = \begin{bmatrix} H_4 & H_4 \\ H_4 & -H_4 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

(4) OVFSF 码

OVFSF 码是 Walsh 函数的一种,其生成原则与 Walsh 相同。

设:一阶 OVFSF 码的初始码字为 0,在其对应的行与列分别放置 0,对角线放置 1,就生成了二阶 OVFSF 码。

以此类推,就可以生成四阶、八阶等 OVFSF 码。

MATLAB 程序如下:

```
close all;
clear all;
global ovfsf;
spr_fac=input('输入扩频因子: ');
code_n=input('输入码编号: ');
if code_n>0 && code_n<=spr_fac
    ovfsf=ovfsf_gen(spr_fac,code_n);
end

function ovfsf=ovfsf_gen(spr_fac,code_n)
ovfsf=1;
global ovfsf
ovfsf=1;
if spr_fac==1
    return;
end
for i=1:1:log2(spr_fac)
    temp=ovfsf;
    for j=1:1:size(ovfsf,1)
        if j==1
            ovfsf=[temp(j,:),temp(j,:);temp(j,:),(-1)*temp(j,:)];
        else
            ovfsf=[ovfsf;temp(j,:),temp(j,:);temp(j,:),(-1)*temp(j,:)];
        end
    end
end
end
if code_n>0
    ovfsf=ovfsf(code_n,:);
end
```

3. 3G 系统中使用的码

在 3G 系统中,扩频码和地址码主要可以划分成如下 3 类:

- (1) 用户地址码;
- (2) 信道地址码;
- (3) 小区地址码。

3.5.2 信道编码

信道编码是提高数据传输可靠性、减少差错的有效方法。

1. 信道编码的定义

信道编码,通过加入校验位、即增加冗余实现纠错和检错能力。其追求的目标,是如何加入最少的冗余位、而获得最好的纠错能力。

信道编码也称为纠错编码或者差错控制编码。

2. 信道编码的分类

信道编码有不同的分类方式:

(1) 根据功能不同,差错控制码可以分为两类:

- ① 检错码;
- ② 纠错码。

检错码只检测信息传输是否出现错误,本身没有纠错的能力,如循环冗余校验码、奇偶校验码等。

纠错码则可以纠正误码错误。

(2) 根据对信息序列处理方法的不同,纠错码可以分为:

- ① 分组码;
- ② 卷积码。

分组码是将信息序列划分为 k 位为一组,然后对各个信息组分别进行编码,形成对应的一个码字。

卷积码也是首先将信息序列划分为组,但当前码组的编译码不仅与当前信息组有关,而且与前面若干码组的编译码有关,这样就利用码组的相关性进行译码。

(3) 根据码元与原始信息之间的关系,纠错码可以分为:

- ① 线性码;
- ② 非线性码。

线性码的所有码元都是原始信息元的线性组合。

非线性码的码元不是信息元的线性组合。

(4) 根据适用差错的类型,纠错码可以分为:

- ① 纠随机错误码;
- ② 纠突发错误码。

纠随机错误码主要适合随机错误信道,纠正其中可能产生的随机错误。

纠突发错误码主要用于纠正信息传输过程中的突发错误。

3. 简单编码

下面通过几个简单的例子,介绍几种简单编码。

【例 3-13】 用 3 位二进制数字码组,传输信息,如何可以纠错?

解:

(1) 3 位二进制数字码组共 8 种组合,可传 8 个信息: 000 表示晴、001 表示云、010 表示阴、011 表示雨、100 表示雪、101 表示霜、110 表示雾、111 表示雹,这时有效性最高,但可靠性最低,无法发现错误。

(2) 若只传 4 种信息: 000 表示晴、011 表示云、101 表示阴、110 表示雨,这时,降低了有效性,但提高了可靠性,可以发现一个错码的错误,例如,000(晴)错一位,则变为 100、010、001 禁码。