

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、传播特性以及各种信道技术。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

对于任何一个通信系统而言，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。

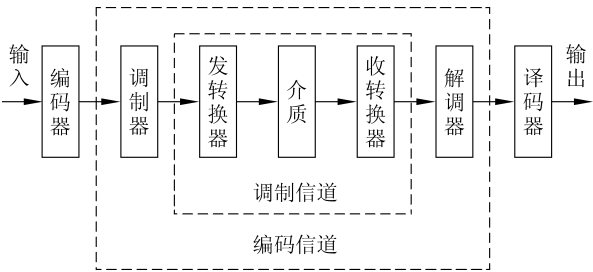


图 3-1 信道的基本组成

通信系统中常用的两种广义信道如下。

(1) 调制信道：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。包括发转换器、介质和收转换器三部分。

(2) 编码信道：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兹至几千吉赫兹。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 3 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,电波传播的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,因此,电波传输环境较为复杂,如图 3-3 所示。

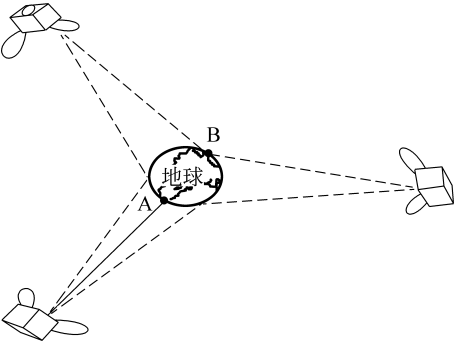


图 3-2 同步卫星通信信道

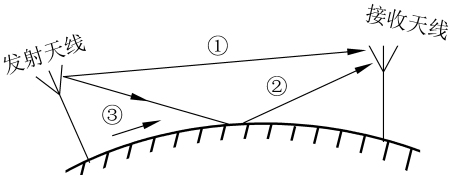


图 3-3 陆地移动通信信道

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 3 种波。

(1) 直接波。

(2) 反射波。

(3) 地面波。

移动通信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 60~1000km 的大气层成为电离层。电离层由分子、原子、离子及自由电子组成。

电离层的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。

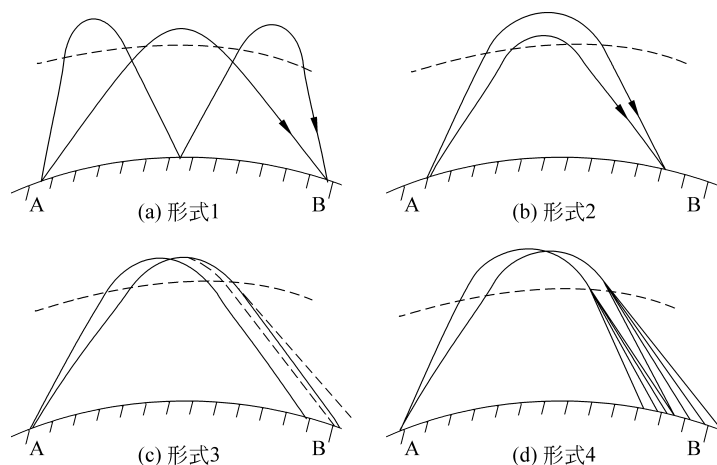


图 3-4 电离层反射多径传播

3.2 无线信道的特征

无线信道与移动通信信道的基本特征是衰落特性。

3.2.1 信号的传播方式

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,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。

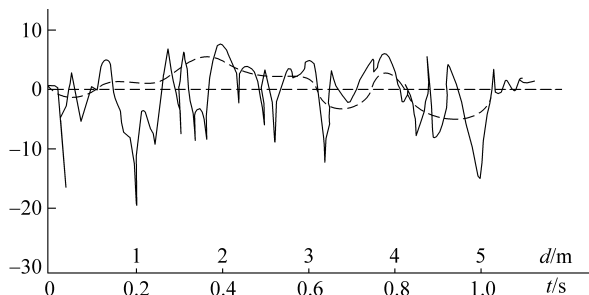


图 3-5 典型信号的衰落特性

【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

$$\omega_c = \frac{qB_0}{m} \quad (3-1)$$

等离子体频率

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{m\epsilon_0}} \quad (3-2)$$

这时,电离层的介电常数张量为

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

其中,本构参数为

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

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

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

求: 当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

$$\omega_c = \frac{qB_0}{m} \rightarrow \infty \quad (3-7)$$

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

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

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,存在以下 5 种波。

- (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。

衰落的主要形式如下。

- (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。

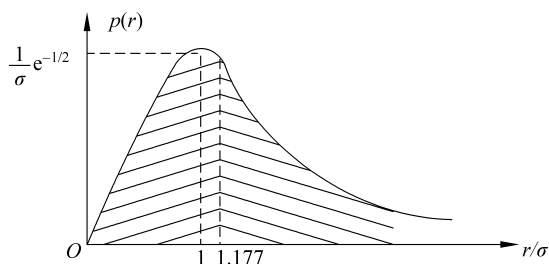


图 3-6 瑞利衰落的概率分布

3.2.3 衰落的分类

根据不同距离内信号强度变化的快慢,衰落可以分为两种。

- (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,它会影响通信信号的传输质量。

根据信号与信道变化快慢程度的比较,衰落可以分为两种。

- (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 3 组曲线。

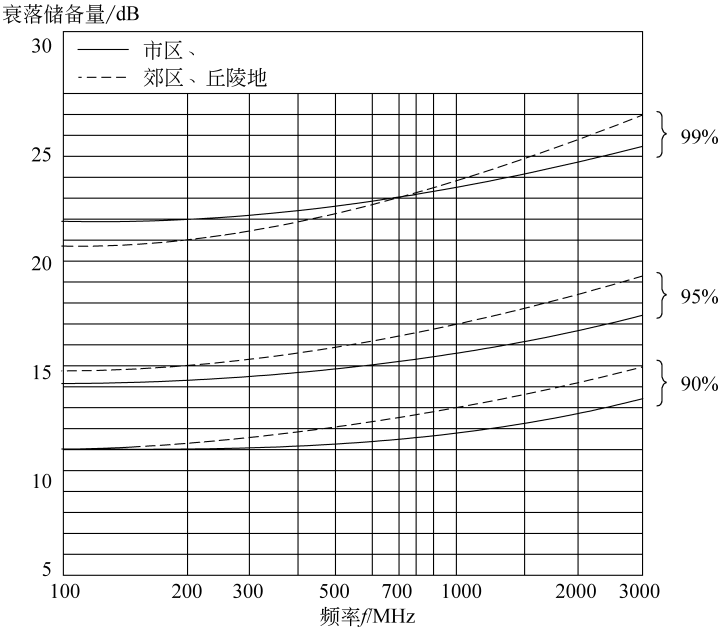


图 3-7 不同系统的衰落储备量

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

【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量。

解: 由图 3-7 可查得,此时必需的衰落储备量约为 22.5dB。

3.2.4 衰落的仿真分析

信号的衰落会降低系统的通信质量。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如下。

- (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);
    Sou=randsrc(1,N(i),[1,0;p,1-p]);      % 产生随机二进制序列
    [sou1,sou2]=Qam_modulation(sou);        % 对产生序列进行 QAM 调制
    sig_ins1=insert_value(sou1,8);          % 插值
    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;
    sig=demodulate_sig(sig_noi1,sig_noi2);  % 解调
    err_bit(i)=length(find(sig_sou)~=0)/N(i); % 计算误比特率
end;
semilogy(snr,err_bit,'- * b');            % 画图
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》。

3.3 无线信道传播模型

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

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

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

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。

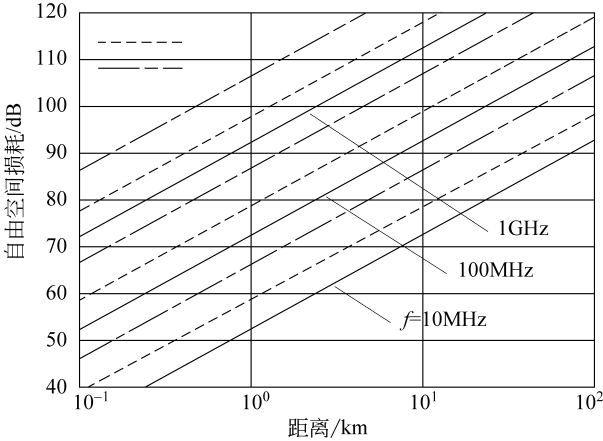


图 3-8 自由空间传播损耗与频率和距离的关系

【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 $L_{bs} = 32.45 + 20\lg d + 20\lg f \quad (\text{dB})$, 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 J.John 模型

Egli J.John 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 3 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。

将城市看作准平滑地形,给出城市场强中值。

对于郊区等不规则地形,给出开阔区的场强中值,以城市场强中值为基础进行修正。

奥村模型适用的范围如下。

- (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。为了简便使用,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。由于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。

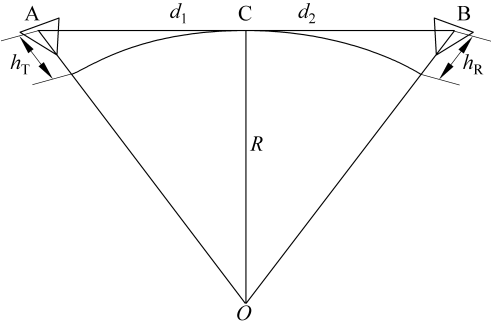


图 3-9 地面视距传播的极限距离

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

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

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 $R=8500\text{km}$,所以,修正后的视距传播的极限距离为

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

说明:式(3-13)和式(3-14)是发送天线和接收天线的实际高度(单位为 m 时),求出来的中继距离对应的单位是 km。这两个公式的计算考虑了地球半径(单位是 km)对应求解出来的结果。

【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

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

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。

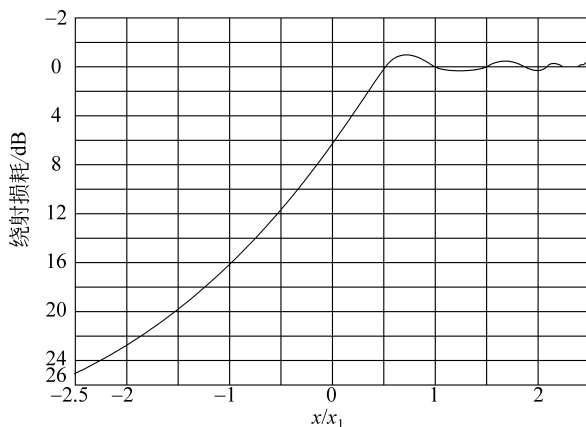


图 3-10 绕射损耗与菲涅尔余隙的关系

图中,横坐标为 x/x_1 , x_1 为菲涅尔半径(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 $f=150\text{MHz}$,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:

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

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

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

第一菲涅尔半径

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

则

$$\frac{x}{x_1} = -1 \quad (3-18)$$

查图 3-10,得附加损耗为 17dB。所以,总的传播损耗为

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

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。

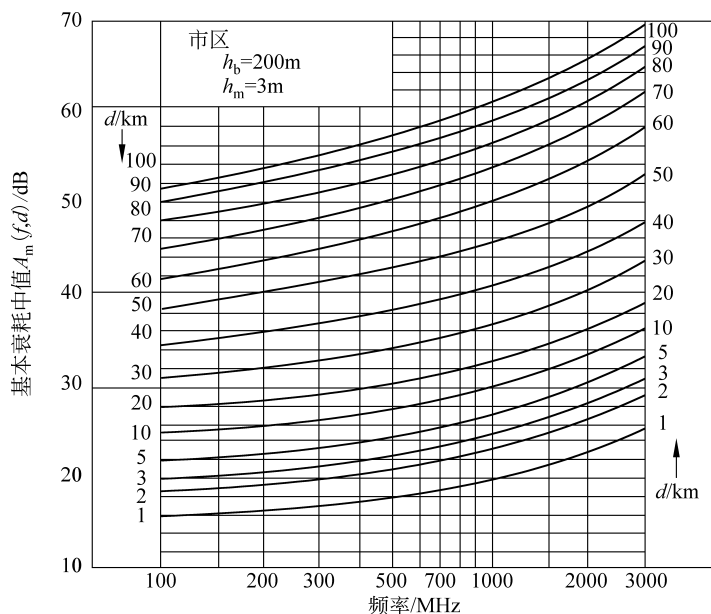


图 3-11 城市准平滑地形的基本损耗中值

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 $h_m = 3\text{m}$ 时,以自由空间传播损耗为基准(0dB),求得的损耗中值的修正值 $A_m(f, d)$ 。

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损耗中值。
- (2) 查图求城市准平滑地形基本损耗中值。
- (3) 进行修正。

【例 3-6】 某地面无线通信系统,工作频率为 900MHz,基站天线高度为 200m,移动台天线高度为 3m,通信距离为 10km,求其在城市街道地区准平滑地形的传播损耗中值。

解: 自由空间的传播损耗中值为

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

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

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

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。

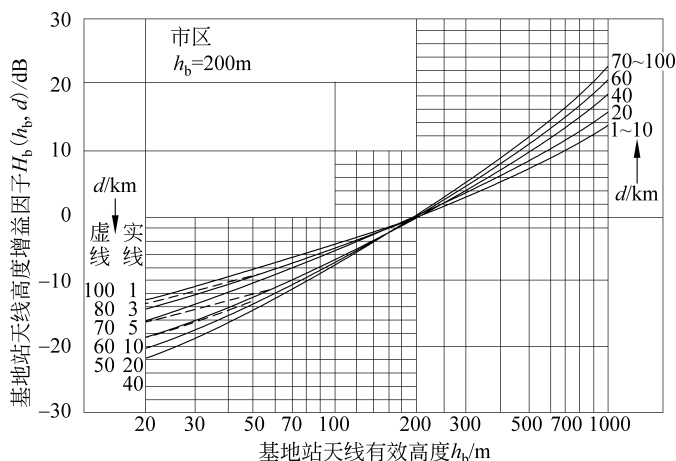


图 3-12 基站天线高度增益因子曲线

图 3-13 为移动台天线高度增益因子曲线。

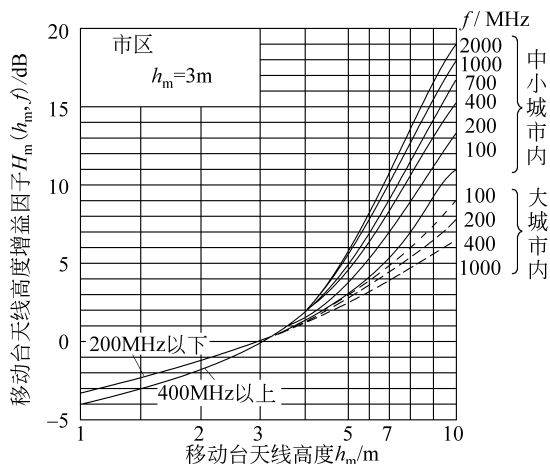


图 3-13 移动台天线高度增益因子曲线

【例 3-7】 某地面无线通信系统, 工作频率为 900MHz, 基站天线高度为 50m, 移动台天线高度为 2m, 通信距离为 10km, 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,修正后的路径损耗中值为

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

【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,求传播路径的损耗中值。

解:

(1) 自由空间传输损耗:

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

(2) 市区准平滑地形的损耗中值:

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损耗中值为

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

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),求传播路径的损耗中值。

解: 由例 3-8,准平滑地形市区路径损耗中值为 $L_T = 155\text{dB}$,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,郊区斜坡路径损耗中值为

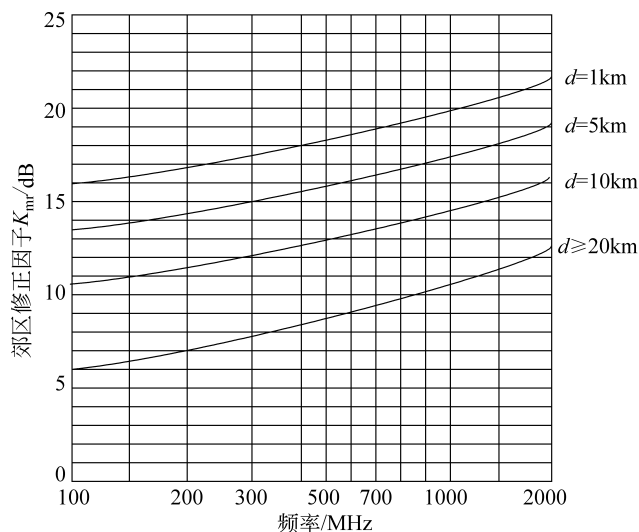


图 3-14 郊区修正因子曲线

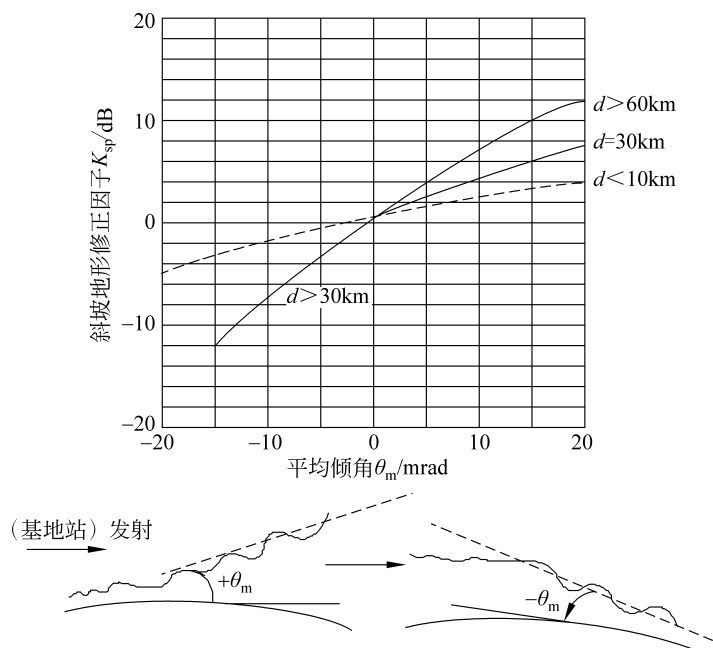


图 3-15 斜坡地形修正因子曲线

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

【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,求移动台天线接收信号功率中值。

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

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

(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

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

所以,

$$\begin{aligned}[P_{PC}] &= [P_T] + [G_b] + [G_m] - L_A \\ &= 10 + 6 - 129 = -113(\text{dBW}) \\ &= -83(\text{dBm})\end{aligned}$$

或

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

【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区域，就不能将收发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如下。

- (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。常用的伪随机码如下。

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。

m 序列的功率谱密度如图 3-17 所示。

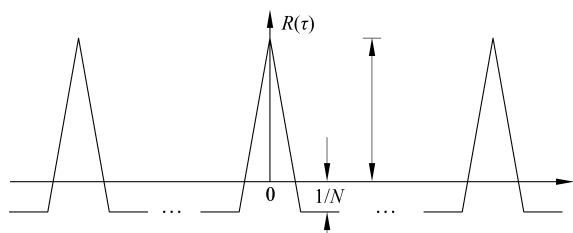


图 3-16 m 序列的自相关函数

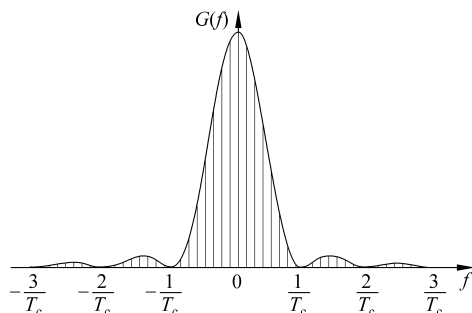


图 3-17 m 序列的功率谱密度

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产生，如 $(45)_8 = (100101)_2$ ，其中， $()_8$ 代表八进制， $()_2$ 代表二进制。MATLAB 程序如下：


```

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');

```

2) Gold 码

Gold 码是一类伪随机序列,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,在工程中得到广泛应用。

Gold 码的生成:当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。

$$\mathbf{H}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

$$\mathbf{H}_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{H}_2 & -\mathbf{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

$$\mathbf{H}_8 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_4 & \mathbf{H}_4 \\ \mathbf{H}_4 & -\mathbf{H}_4 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

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,可以生成四阶、八阶等 OVFSF 码。

MATLAB 程序如下:

```
close all;
```

```

clear all;
global ovsf;
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
    ovsf=ovsf_gen(spr_fac,code_n);
end

function ovsf=ovsf_gen(spr_fac,code_n)
ovsf=1;
global ovsf
ovsf=1;
if spr_fac==1
    return;
end
for i=1:1:log2(spr_fac)
    temp=ovsf;
    for j=1:1:size(ovsf,1)
        if j==1
            ovsf=[temp(j,:),temp(j,:);temp(j,:),(-1)*temp(j,:)];
        else
            ovsf=[ovsf;temp(j,:),temp(j,:);temp(j,:),(-1)*temp(j,:)];
        end
    end
end
end
if code_n>0
    ovsf=ovsf(code_n,:);
end
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来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的不同,纠错码可以分为两类。

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,这样就能够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,纠错码可以分为两类。

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,纠错码可以分为两类。

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,如何进行纠错?

解:

(1) 3 位二进制数字码组共 8 种组合,可传 8 种信息: 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 或 001,这三种码都是禁码。

(3) 若只用 2 个码: 000 表示晴、111 表示雨,则有效性进一步降低,但可靠性进一步提高,可发现两个错误,纠正一个错误。例如,100 若错一位,则它应为 000。

这就是牺牲了有效性,提高了可靠性。从不能发现错误,到可以发现错误并且能纠正错误。

【例 3-14】 奇偶监督码。

解:

信息位 监督位