

移动通信技术丛书



超短波无线电  
信号传播

马双久 编

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了陆上超短波移动无线电通信系统中电波传播的原理及特点,包括移动无线电信号的统计特性、电波传播及场强预测、漏泄同轴电缆及其应用、天线对电波传播的影响以及计算机在场强测量和预测中的应用。

本书可供从事移动无线电研究、设计和生产维修部门中的技术人员使用和参考。

移动通信技术丛书

### 超短波无线电信号的传播

马双久 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 黄成士 封面设计 王锦平

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京顺义燕华营印刷厂印

开本: 787×1092 毫米  $\frac{1}{32}$  印张: 12.376 字数: 276 千

1988年1月第1版第1次印刷

印数: 0001—3,000 册 定价: 2.15 元

## 序 言

移动通信已经在国内外得到广泛重视和发展,业务范围日益扩大,涉及到国民经济各个领域。但所有移动通信在进行系统设计和质量评价时,都不可避免地会遇到一个最基本的问题,即移动无线电信号的传播特性。不同业务,由于使用环境条件不同,采用的频段和传输方式不同,信号的传播特性也各不相同,而且利用经典理论和解析方法预测很难奏效。因而在过去几十年中人们在移动信号的传播方面进行了大量的试验和研究,逐渐开始形成一个特殊的技术分支。总的看来,这方面的工作仍需继续进行和发展,但是当前移动通信业务的广泛应用又迫切需要这方面的理论指导,为适应这种需要,我们比较系统地搜集了这方面的资料,在此基础上编写成本书。在取材方面既考虑到较为系统地介绍最基本的理论和技术,也尽力照顾到实际应用,避免过多的复杂的数学推导。本书的前两章主要介绍超短波空间信号传播规律和特性;第三章介绍作为引导波形式出现的漏泄同轴电缆的基本原理和特性,并结合铁路隧道中的列车无线电通信系统较为详细地讨论了它的实际应用;最后的两章,一部分简要地介绍了移动环境下天线的影响及特性,另一部分介绍了计算机在场强测量和场强预测中的应用。由于这些内容涉及到的问题比较复杂,有些工作尚在继续试验和研究,所以对有关的一些技术还需以发展的观点看待,加上编者水平有限,不妥之处,恳请读者批评指正。

---

本书在编写过程中得到铁道科学研究院李德余副研究员的大力帮助并审阅了全书，提出了宝贵意见，在此致以衷心感谢。

编 者

一九八四年九月北京

---

# 目 录

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| <b>第一章 移动无线电信号的统计特性</b> .....    | (1)   |
| 第一节 概    要.....                  | (1)   |
| 第二节 散射现象及多径衰落.....               | (3)   |
| 第三节 接收信号的包络特性.....               | (10)  |
| 第四节 接收信号的相位特性.....               | (38)  |
| <b>第二章 移动无线电信号的传播</b> .....      | (53)  |
| 第一节 电波传播的基本理论.....               | (54)  |
| 第二节 电波在隧道中的传播.....               | (71)  |
| 第三节 树木对电波传播的影响.....              | (105) |
| 第四节 地形地物的分类和电波传播特性的分<br>析方法..... | (125) |
| 第五节 准平滑地形下的通路衰减.....             | (130) |
| 第六节 不规则地形下的传播特性.....             | (142) |
| 第七节 场强的场所变化特性.....               | (147) |
| 第八节 场强的预测方法.....                 | (153) |
| 第九节 场强测量和数据处理.....               | (179) |
| <b>第三章 漏泄同轴电缆及其应用</b> .....      | (192) |
| 第一节 LCX的基本特性.....                | (196) |
| 第二节 LCX的架设及环境影响.....             | (218) |
| 第三节 纵向开槽漏泄同轴电缆.....              | (259) |
| 第四节 漏泄同轴电缆的应用.....               | (272) |
| <b>第四章 计算机在场强预测和测量中的应用</b> ...   | (306) |
| 第一节 利用计算机进行场强预测.....             | (307) |
| 第二节 计算机在场强测量中的应用.....            | (340) |

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 第五章 天线对传播的影响..... | (352) |
| 第一节 移动天线.....     | (352) |
| 第二节 基地天线.....     | (365) |
| 第三节 极化影响.....     | (368) |
| 第四节 袖珍台天线.....    | (372) |

---

# 第一章 移动无线电信号的统计特性

## 第一节 概 要

移动无线电通信技术作为通信领域中的一个重要分支，近几年来得到了迅速的发展，已经开始广泛地用于海、陆、空各种移动业务和社会活动中。因为这种通信是以实现移动体之间或移动体与基地台之间的信息传输和交换为目的的，所以其信号的传输除了具有无线电电波传播的一般问题之外，还具有许多新的特点和规律，这种特性无不与移动体的运动有关。例如空间飞行器之间的通信，地对空的飞机通信，移动卫星通信，以及陆地上的汽车、火车通信等都各有其特点。地对空的飞机（飞行器）通信，由于飞行体的速度十分高，所以在无线电信号传输过程中必然产生严重的多普勒效应；卫星地面通信由于无线电信号需要经过上万公里的距离传送到卫星中转站，然后返回地面接收，所以产生了严重的时延；陆上的汽车或列车无线通信则由于移动台放在车上，天线高度与周围地物相比很低，所以移动台接收到的信号，经常是经过天线周围许多障碍物（包括建筑物，山峰等）产生反射、折射、绕射后几个波到达天线合成的，而这一反射折射等在每一地点又都是变化不定的，用经典的传播理论或资料已无法预测。这样就必须专门研究移动通信中的信号传播特性。

在移动通信系统设计中，我们最关心的问题是无线电信号的场强分布和预测，计算通路损失，确定最小电平。这里

遇到的技术问题便是研究和掌握电波在各种地形地物下的传播和变化规律。如上所述,因为移动台接收的信号,例如车辆驶入市区或列车进入山区、丘陵地带时,由于地形地物的阻挡,破坏了收发天线之间的直视条件,接收到的信号是由许多反射波和直射波叠加而成,场强信号幅度,变成一随机变量,这时用简单的解析方法便无法解决。图 1—1 是列车进入车站时,从移动天线记录下来的场强信号随距离变化的情况,可见列车移动几米,信号幅度就会发生几十分贝的起伏变化。要确定这种信号的幅度及变化规律,显然只能用统计的方法进行。因此,在本章中研究的第一个问题是衰落信号的产生及其幅度变化特性。其中包括信号幅度衰落变化规律——概率密度、概率分布以及与无线电数字传输有关的幅度电平交叉率和衰落持续时间等。

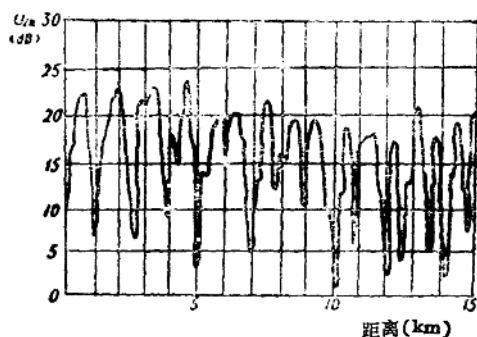


图 1—1 场强变化实测曲线

因为移动天线接收到的信号经常是由若干个反射、折信号叠加而成的(这种现象称多径接收),所以除了幅度是一个随机变化量之外,其合成相位也是时刻变化的随机过程。相位的变化必然产生频率的变化,这在调频方式的接收中就产生了不可忽略的随机调频影响,结果又影响到通信质量。



此, 讨论的第二个问题便是衰落信号的相位特性。这部分内容是移动通信系统设计最基础的东西, 但涉及到较多的数学, 已超出本书的范围。这里仅作最基本的介绍, 详细论述见有关参考资料。

## 第二节 散射现象及多径衰落

如上所述, 在陆上移动通信系统中, 移动天线处接收下来的信号是由周围障碍物散射回来的若干个信号叠加而成, 这种现象称为多径传输。这种散射现象在市区和山区发生的最多, 因此成为系统设计最关心的一个问题。

假定无线电信号的射频频率为  $f_0$ ,  $a_0$  代表幅度,  $\phi_0$  代表其相位, 则这个信号  $S_0(t)$  可表示为

$$S_0(t) = a_0 \exp[j(\omega_0 t + \phi_0)] \quad (1-1)$$

式中  $\omega_0$  ——角频率,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。

从下面的讨论可以知道, 在散射的情况下, 移动天线接收下来的合成信号的幅度, 将随着车辆的运动产生快速的起伏变化, 这种变化称为衰落。因为这时的衰落是由多径传输造成的, 所以通常称为多径衰落。下面我们将分三种情况研究这种多径衰落。

### 一、车辆（移动台）和邻近的散射体都处于 固定不动状态

这种静止状态的散射, 其各条反射的路径均固定不变, 如图 1-2 所示, 各条反射路径都可以分别进行计算。假定接收到的信号为  $S(t)$ , 且由  $N$  个路径的反射信号组成, 则  $S(t)$  可写成如下形式:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N a_i S_0(t - \tau_i) \quad (1-2)$$

对于第*i*条路径，总传输时间为

$$\tau_i = \bar{\tau} + \Delta\tau \quad (1-3)$$

式中  $\bar{\tau}$  —— 时延平均值，且  $\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i$

$\Delta\tau$  —— 第*i*条路径相对于平均值  $\bar{\tau}$  的附加时延量，

$a_i$  —— 第*i*条路径上的传播衰减因子。

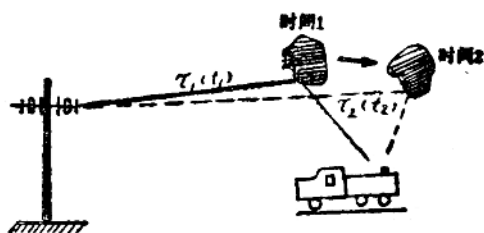
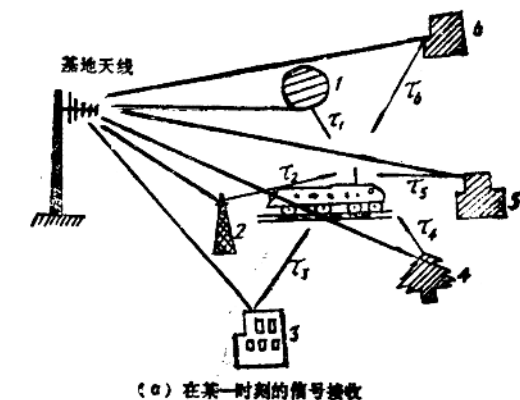


图 1-2 多径效应

由式 (1-1) 和式 (1-2) 可以求得

$$S(t) = \sum_{i=1}^N a_i a_0 \exp\{j[\omega_0(t - \tau_i) + \phi_0]\} \quad (1-4)$$

从式 (1-4) 即可求出接收信号  $S(t)$  的包络  $x(t)$ :

$$x(t) = a_0 \left[ \sum_{i=1}^N a_i \exp(-j2\pi f_0 \Delta \tau_i) \right] \quad (1-5)$$

从这个表示式可以看出: 在第一种多径效应下, 接收信号的幅度包络, 仅与各条路径的衰减因子和时延有关, 而与时间  $t$  无关, 其值为一定值。因此, 只要车辆和周围各反射物保持不动, 接收信号的包络就不变。

## 二、车辆 (移动台) 固定不动, 散射体处于运动状态

移动台 (车辆) 保持不动, 其周围的反射体, 如建筑物, 运动中的车辆等都处于变化着的运动状态。这时, 路径衰减因子和时延随时间而变化, 接收到的信号可用下式描述:

$$S(t) = x(t) \exp(j\phi_0) \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1-6)$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_0 a_i(t) \exp[-j2\pi f_0 \tau_i(t)] \quad (1-7)$$

如果令

$$R = \sum_{i=1}^N a_0(t) \cos[2\pi f_0 \tau_i(t)] \quad (1-8)$$

$$S = \sum_{i=1}^N a_0(t) \sin[2\pi f_0 \tau_i(t)] \quad (1-9)$$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad x(t) &= a_0 \{ R - jS \} \\ &= A(t) \exp[-j\psi(t)] \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中  $A(t)$  —— 幅度, 且  $A(t) = a_0 \sqrt{R^2 + S^2}$ ;

$\psi(t)$ ——相位，且  $\psi(t) = \arctg \frac{S}{R}$ 。

因为散射体都处于运动中，所以反射波也是随着时间变化而不断地变化。这时包络的幅度  $A(t)$  和相位  $\psi(t)$  便成为时变的随机变量，它们与窄带噪声的特性十分相似， $A(t)$  和  $\psi(t)$  呈统计独立，而且如果  $\psi(t)$  在  $0 \sim 2\pi$  呈均匀分布时， $A(t)$  的概率密度函数服从瑞利分布。

### 三、散射体固定不动，车辆（移动台）处于运动状态

假定仅移动台运动，这时将会发生三种极端情况：

(1) 在移动体周围无散射体；(2) 存在一个散射体；(3) 存在许多散射体。假定有一车辆电台沿着  $x$  轴方向运动，其运动速度为  $v$ ，接收到的信号是从与  $x$  轴呈某一角度  $\theta$  的方向发射出来的，如图1—3所示。这时移动天线接收到的信号为

$$S(t) = a_0 \exp[j(\omega_0 t + \phi_0 - \beta v t \cos \theta)] \quad (1-11)$$

式中  $\beta$ ——相位常数，且  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ ；

$\lambda$ ——波长。

式中的项  $\beta v t \cos \theta$  表示由于车台运动相位产生了一个附加变化，相当于信号频率发生变化，这就是雷达技术中所说的多普勒效应。这个附加的多普勒频率  $f_d$  可表示为

$$f_d = f_m \cos \theta \quad (1-12)$$

式中  $f_m$ ——最大多普勒频率，且  $f_m = v/\lambda$ 。多普勒频率可以为正或负，与入射波到达角有关，在地对空通信中，因飞行器速度很高，其影响最大。

为便于理解多径效应现象的形成，我们用驻波效应解

释。假定移动天线接收到的信号来自  $\theta$  方向，且该信号恰好碰到一个理想的完全反射体，然后反射到天线，如图1—3(b)所示，在移动天线处叠加合成的接收信号（为简单起见

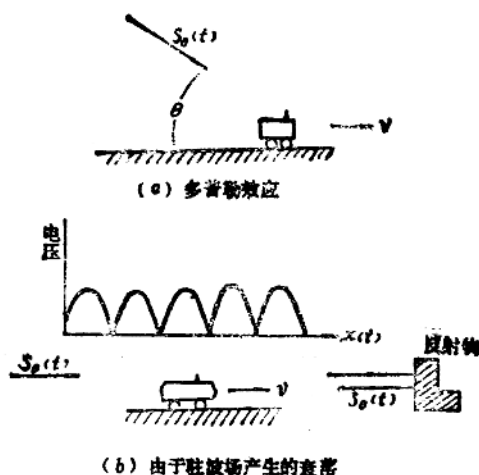


图1—3 移动台运动情况下的信号接收

这里设  $\theta = 0$  ) 可表示为  $S(t)$ ，则

$$\begin{aligned}
 S(t) &= a_0 \exp[j(\omega_0 t + \phi_0 - \beta vt)] - a_0 \exp[j(\omega_0 t + \phi_0 + \beta vt - \omega_0 \tau)] \\
 &= -j2a_0 \sin\left(\beta vt - \frac{\omega_0 \tau}{2}\right) \exp\left[j\left(\omega_0 t + \phi_0 - \frac{\omega_0 \tau}{2}\right)\right]
 \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中  $\tau$ ——电波投射到散射体又反射回到天线所经历的时间。

从式(1—13)可以知道，合成信号的幅度呈驻波形式，即

在车辆行驶的路径上，场强发生周期的起伏变化，因此在接收机中收到的信号便产生了起伏衰落现象。当  $\beta vt = n\pi + \omega_0\tau/2$  时，衰落出现最小值。如果用平方律检波器检测这个驻波场的分布，则包络被平方，且可表示为

$$x^2(t) = 4a_0^2 \sin^2 \left( \beta vt - \frac{\omega_0\tau}{2} \right) \\ = 2a_0^2 [1 - \cos(2\beta vt - \omega_0\tau)] \quad (1-14)$$

从式 (1-14) 可以知道，衰落频率为  $2v/\lambda$ 。由此可以推论，采用不同检波方式进行检测，输出信号可以得到不同的衰落频率。用平方律检波比用线性检波得出的衰落频率大二倍，比较式 (1-13) 和式 (1-14) 就可以证明。

图1-4表示车辆通过城市街道时电波典型传播情况。由于在街道两旁存在着许多建筑物，车上移动天线接收到的信号基本是从各个角度反射而来的信号叠加。这种情况不但在城市汽车通信经常遇到，在列车无线系统中，当列车驶入市区车站附近或运行于山区地带时也经常发生。在此情况下所产生的最大多普勒频率  $f_d$  为

$$f_m = |f_d|_{\max} = \left( \frac{v}{\lambda} \cos \theta \right)_{\max} = \frac{v}{\lambda} \quad (1-15)$$

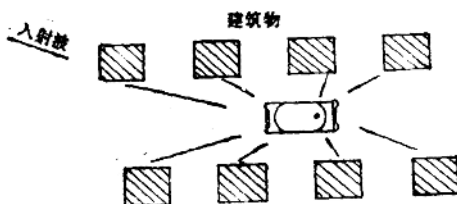


图 1-4 多个反射体时的电波传播

应该指出，上述分析都是建立在接收信号是由许多反射信号

相叠加的模型基础上的。但实际上,接收信号并不全都如此,例如在平坦的传输通路上,经常存在一个较强的直射波分量,这时散射场模型不再适合,须使用一正弦波分量和窄带噪声相加的理论去分析。这时合成信号的包络不再是瑞利分布,而是呈赖思分布。其有关特性后面还将介绍。而这种情况对于列车无线电通信也是经常存在的。

在移动无线电信号传输过程中,由于多径效应不但影响到信号幅度随机变化,而且还会使信号产生时延。例如在无线电数字传输系统中,有时基地台发射的是脉冲信号 $S_0(t) = a_0 \delta(t)$ 。由于在传输过程中受到多径效应影响,移动台所接收到的信号明显的被拖长,一个脉冲变成了一串,图1—5表示出了这种延时现象的产生过程。移动台收到的信号可由下式表示,即

$$S(t) = a_0 \sum_{i=1}^n a_i \delta(t - \tau_i) \cdot e^{j\omega \tau_i} \quad (1-16)$$

$$= E(t) \cdot e^{j\omega t}$$

式(1—16)表示的是一串载频角频率为 $\omega$ 的离散脉冲信号。反射体越多,形成的脉冲串越长。这个脉冲串的长度 $\Delta$ 通常称为时延扩散。显然,它会限制信号的发射,即前后发射的两个相邻脉冲信号之间必须有适当的间隔时间。这就意味着信号传输速率必须降低,使其重复周期小于 $1/\Delta$ ,以避免在传输信道上,由于存在瑞利衰落而造成码间干扰。

在城市内的汽车通信系统中,有人进行过实际的测量,结果表明在市区内的时延扩散影响要比郊区大。以包络的最高电平为基准,在 $-30\text{dB}$ 的电平上测量,在 $4\text{km}$ 的传输路上最大时延扩散可大于 $12\mu\text{s}$ ,而在郊区的平均时延扩散约为 $0.5\mu\text{s}$ 。因此,当信号的传输速率高于 $2\text{MHz}$ 时,将会

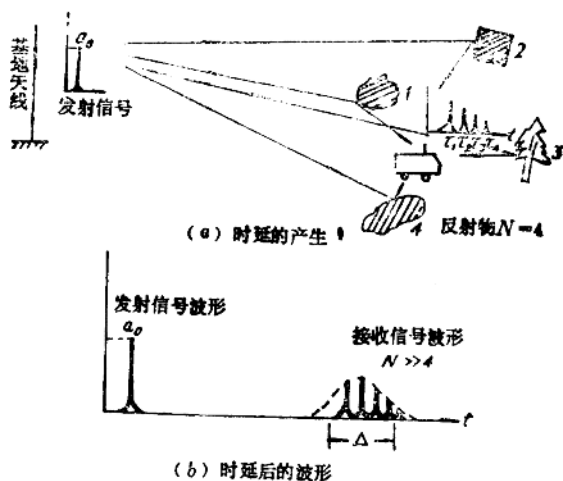


图 1—5 无线电信号的时延扩散

产生码间干扰。为解决这个问题。在移动通信中经常采用分集接收技术。为了使传输信道不会因存在多径衰落而降低系统的特性，信号传输速率必须限制在这个数值以下。一般说，只要发射频率高于30MHz，时延扩散与频率几乎无关。

### 第三节 接收信号的包络特性

#### 一、长时间衰落与短时间衰落

在传输信道中存在衰落的情况下，接收信号一般可表示为

$$S(t) = r(t)e^{j\psi(t)} \quad (1-17)$$

式中， $r(t)$ 代表信号包络变化， $\psi(t)$ 代表相位变化，都是随机变量。图1—6是场强随距离（或时间）变化的实测曲线。



可见测量出的信号幅度场强是随距离的变化,除了平均值(或中值)缓慢变化之外,上面还叠加一快速的瞬时起伏变化、前者称长时间衰落,后者称短时间衰落(有的分别称为中值衰落和瞬时值衰落)。因此,  $r(t)$  可以分成两部分表示,即

$$r(t) = m(t) r_0(t) \quad (1-18)$$

这里,  $m(t)$  表示长时间衰落,  $r_0(t)$  表示短时间衰落。如果用  $m(y)$  表示某一地点  $y$  在时间  $t$  时接收到的信号,则  $m(y)$  表示是本地平均 (Local mean), 这时上式可改写为

$$t(y) = m(y) r_0(y) \quad (1-19)$$

任一瞬间接收到的信号  $S(t)$ , 不但包含有包络信息,而且也有相位信息  $\psi(t)$ 。不过在线路设计中并不使用  $\psi(t)$ ,但是它直接影响到信号的特性和通信质量,这放在下节讨论。

如果传输信道中不存在多径衰落,那么只需考虑传播路径损失;如果存在严重的衰落,则式中的  $r_0(y)$  不能看成是固定不变的。但是为了求出  $r_0(y)$  的变化,需要先提取出  $m(y)$ ,因此要对量  $m(y)$  求估值  $\hat{m}(y)$ 。 $\hat{m}(y)$  一般是对  $y$  处接收到的信号包络  $r(t)$  进行平均处理而得到,然后将  $m(y)$  剔取出

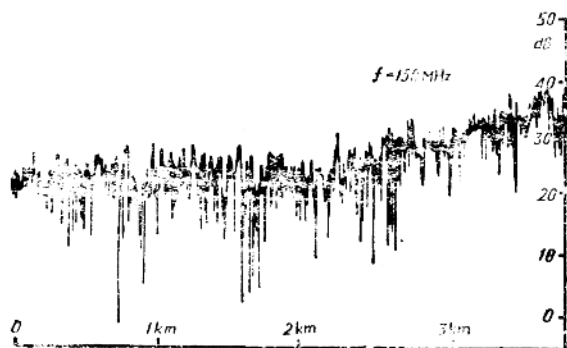


图1-6 实测场强变化曲线