



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字移动通信技术

(第2版)

何林娜 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字移动通信技术

第2版

主 编 何林娜
副主编 邓 琛
参 编 陈益平
主 审 罗汉文 李 莉



机械工业出版社

本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，系统地阐述了现代数字移动通信的基本原理、基本技术和当前广泛应用的典型数字移动通信系统，较充分地反映了当代数字移动通信的最新发展。

全书共6章，主要内容有：移动通信概述、移动通信的电波传播、移动信道中的干扰和场强估算，移动通信组网技术，TDMA 数字蜂窝移动通信系统，CDMA 数字蜂窝移动通信系统和第三代、第四代数字蜂窝移动通信技术的综述。每章后均附有习题。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术和其他相近专业的本科和研究生教材，也可作为通信工程以及相关专业的技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

数字移动通信技术/何林娜主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2010.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-30961-1

I. ①数… II. ①何… III. ①数字通信：移动通信—高等学校—教材
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 107306 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：闫晓宇 责任编辑：闫晓宇 责任校对：刘志文

封面设计：张 静 责任印制：乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2010 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·353 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-30961-1

定价：26.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者服务部：(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在第1版，即“应用型本科电子与通信类系列教材”之一的基础上，经过多年教学实践后修订而成的。

针对应用型本科电子与通信专业的教学特点，我们编写了本书。本书在内容的选取上，注重基础性、实用性、系统性以及反映现代移动通信技术的最新发展；在文字上力求条理清晰、通俗易懂；对于需要的数学公式，除简单的数学分析，尽量避免繁琐的数学推导，以突出重点。

本书系统地阐述了现代数字移动通信的基本原理、基本技术和当前广泛应用的典型数字移动通信系统，较充分地反映了当代数字移动通信发展的新技术。主要内容有：移动通信概述、移动通信的电波传播、移动信道中的干扰和场强估算，移动通信组网技术，TDMA 数字蜂窝移动通信系统，CDMA 数字蜂窝移动通信系统，第三代和第四代数字蜂窝移动通信系统。全书每章后均附有习题。

本书的参考学时数为60，可根据教学要求、专业特点和课程设置等具体情况进行适当的取舍，灵活掌握。

本书由上海工程技术大学的何林娜老师担任主编，邓琛老师担任副主编，由上海交通大学罗汉文教授和上海师范大学李莉教授主审。全书共分6章。何林娜老师编写第1、2、3、4章，邓琛和陈益平老师编写第5章，陈益平老师编写第6章。

本书在编写过程中，得到了罗汉文教授和李莉教授的多方关怀和指导，两位教授提出了许多建设性的意见和建议，在此深表谢意。本书还得到了上海工程技术大学的大力支持和帮助，在此表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2009年12月

目 录

前言

第1章 移动通信概述	1
1.1 引言	1
1.2 移动通信的发展历程	1
1.2.1 第一代模拟蜂窝移动通信系统	1
1.2.2 第二代数字蜂窝移动通信系统	2
1.2.3 第三代数字蜂窝移动通信系统	3
1.2.4 第四代数字移动通信系统	4
1.3 移动通信的电波传播	4
1.3.1 直射波	5
1.3.2 视距传播的极限距离	5
1.3.3 绕射损耗	6
1.3.4 反射波	7
1.3.5 多径效应与瑞利损耗	7
1.4 移动信道中的干扰	8
1.4.1 邻道干扰	8
1.4.2 同信道干扰	10
1.4.3 互调干扰	12
1.4.4 近端对远端的干扰	13
1.5 移动信道的场强估算	14
1.5.1 奥村 (Okumura) 模型	14
1.5.2 Okumura - Hata 方法	24
1.5.3 微蜂窝系统的覆盖区预测模式	24
习题	26
第2章 移动通信组网技术	27
2.1 移动通信网的体制	27
2.1.1 大区制移动通信网	27
2.1.2 小区制 (蜂窝) 移动通信网	28
2.2 GSM 数字蜂窝移动通信系统结构	30
2.2.1 移动台 (MS)	31
2.2.2 基站子系统 (BSS)	32
2.2.3 网络子系统 (NSS)	33
2.3 GSM 数字蜂窝通信系统的网络接口	36
2.3.1 主要接口	36

2.3.2	网络子系统内部接口	38
2.3.3	GSM 系统与其他公用电信网的接口	40
2.3.4	各接口协议	40
2.4	移动通信的信道结构和频率资源的有效利用技术	41
2.4.1	移动通信的信道结构	41
2.4.2	频率资源的管理	42
2.4.3	频率的有效利用技术	43
2.4.4	多信道共用技术	44
2.5	蜂窝移动通信的多址接入技术	49
2.5.1	概述	49
2.5.2	多址方式与系统容量	53
2.6	数字蜂窝移动通信的交换技术	56
2.6.1	数字蜂窝移动通信呼叫建立过程	56
2.6.2	越区切换	57
	习题	59
第3章	TDMA 数字蜂窝移动通信系统	60
3.1	GSM 数字蜂窝移动通信系统的电信业务	60
3.1.1	承载业务	61
3.1.2	电信业务	61
3.1.3	补充业务	62
3.2	GSM 数字蜂窝通信系统的无线传输方式	63
3.2.1	TDMA/FDMA 接入方式	63
3.2.2	信道及其组合	65
3.2.3	时隙的格式	68
3.2.4	信道的组合方式	71
3.3	GSM 数字蜂窝通信系统的主要技术	74
3.3.1	语音和信道编码技术	74
3.3.2	跳频和间断传输技术	75
3.3.3	调制与解调技术	77
3.3.4	鉴权与加密技术	77
3.3.5	位置登记	81
3.3.6	GSM 的区域与号码	83
3.4	GSM 数字蜂窝通信系统的接续流程	86
3.4.1	移动台开机后的工作	86
3.4.2	小区选择 (Cell Selection)	86
3.4.3	位置登记和位置更新 (Location Registration and Location Updating)	87
3.4.4	建立通信链路 (Establishing Communication Link)	87
3.4.5	起初信息过程 (Initial Message Procedure)	88
3.4.6	鉴权 (Authentication)	88

3.4.7 加密 (Ciphering)	88
3.4.8 位置更新过程 (Location Updating Procedure)	88
3.4.9 通信链路的释放 (Release of Communication Link)	89
3.4.10 移动台主叫 (Mobile Origination)	89
3.4.11 移动台被呼 (Mobile Termination)	90
3.4.12 切换 (Handover)	92
3.5 三种 TDMA 数字蜂窝移动通信系统的比较	94
3.5.1 三种 TDMA 数字蜂窝移动通信系统的主要性能	94
3.5.2 美国数字蜂窝移动通信系统 (D-AMPS) 的特征	94
3.5.3 日本数字蜂窝移动通信系统 (JDC) 的特征	96
习题	97
第4章 CDMA 数字蜂窝移动通信系统	98
4.1 扩频通信的基本概念	98
4.1.1 扩频通信的理论基础	98
4.1.2 处理增益和抗干扰容限	99
4.1.3 直接序列扩频	99
4.2 CDMA 数字蜂窝移动通信系统	101
4.2.1 CDMA 数字蜂窝移动通信系统的网络结构与组成	101
4.2.2 系统参数与使用频段	106
4.2.3 CDMA 系统的特点	106
4.2.4 CDMA 系统的逻辑信道	110
4.3 CDMA 正向信道	112
4.3.1 正向信道组成	112
4.3.2 正向 CDMA 的控制信道	116
4.3.3 正向 CDMA 的业务信道	120
4.4 CDMA 反向信道	126
4.4.1 反向信道组成及特点	126
4.4.2 接入信道	131
4.4.3 反向业务信道	136
4.5 CDMA 蜂窝网的关键技术	138
4.5.1 CDMA 系统的分集技术	138
4.5.2 CDMA 系统的正交调制与正交扩频技术	144
4.5.3 CDMA 系统的语音编码技术	146
4.6 CDMA 系统控制功能	147
4.6.1 正向链路的功率控制	148
4.6.2 反向链路的功率控制	148
4.7 CDMA 系统的切换技术	150
4.7.1 CDMA 的3种切换方式	150
4.7.2 CDMA 的软切换过程	150

4.8 CDMA 位置登记和呼叫处理	152
4.8.1 登记注册	152
4.8.2 呼叫处理	154
4.8.3 呼叫流程图	157
习题	159
第5章 第三代移动通信系统	161
5.1 第三代移动通信系统简介	161
5.1.1 概述	161
5.1.2 第三代移动通信系统的标准	162
5.1.3 第三代移动通信系统的特点	163
5.1.4 3G 参数	164
5.2 WCDMA	165
5.2.1 概述	165
5.2.2 WCDMA 系统组成	167
5.2.3 系统接口	169
5.2.4 WCDMA 版本	169
5.3 CDMA2000	176
5.3.1 概述	176
5.3.2 CDMA2000 采用的主要新技术	177
5.3.3 系统结构	179
5.3.4 主要接口	180
5.3.5 空中接口的分层结构	180
5.3.6 信道分配	181
5.4 TD-SCDMA	184
5.4.1 TD-SCDMA 的优势	184
5.4.2 网络结构	189
5.4.3 系统信道	189
5.5 WiMAX	191
5.5.1 WiMAX 标准	191
5.5.2 WiMAX 技术特点	192
5.5.3 WiMAX 网络架构	193
5.5.4 网络接口	195
习题	196
第6章 第四代移动通信系统	197
6.1 概述	197
6.1.1 4G 移动通信系统设计目标	197
6.1.2 4G 移动通信系统体系结构	199
6.1.3 4G 移动通信系统候选标准体系结构	199
6.1.4 目前 4G 移动通信系统面临的一些议题	200

6.1.5 各国 4G 的发展情况概述	200
6.1.6 我国 4G 进展程度	200
6.2 4G 移动通信系统关键技术	201
6.2.1 无线接入网络	201
6.2.2 核心网	203
6.2.3 终端	204
6.3 3GPP LTE	204
6.3.1 LTE 由来	205
6.3.2 LTE 目标	205
6.3.3 系统架构演进	205
6.3.4 体系结构	206
6.3.5 物理层演进	207
6.3.6 链路层演进	211
习题	211
附录 缩略词	212
参考文献	220

第 1 章 移动通信概述

1.1 引言

移动通信是指通信的双方或至少有一方是在移动中进行信息传输和交换。随着社会的发展和科学技术的进步，人们希望能随时随地、迅速可靠地与通信的另一方进行信息交流。这里所说的“信息交流”，不仅指双方的通话，还包括数据、传真和图像等通信业务。例如固定点与移动体（如汽车、轮船、飞机）之间、移动体与移动体之间、人与运动中的人或人与移动体之间的信息传递，都属于移动通信。

由于移动通信是移动体在运动中进行通信联系的，信号的传输必须依靠无线电波，因此无线电通信是移动通信的基础。移动体与固定体之间通信联系时，除了要依靠无线通信技术之外，还要依赖于有线通信网络技术，例如公众电话网（PSTN, Public Services Telephone Network）、公众数据网（PDN, Public Digital Network）、综合业务数字网（ISDN, Integrated Services Digital Network）。

通信系统是指包括双方通信设备在内的整体。移动通信系统包括公用陆地蜂窝移动通信系统、无线寻呼系统、无绳电话系统、集群移动通信系统、卫星移动通信系统 and 无中心移动通信系统等。目前应用最广泛的是公用蜂窝移动通信系统，它具有涉及的技术领域广、技术新、网络能力强等特点，它的发展代表着整个移动通信未来的方向。

随着电子技术，特别是半导体、集成电路和计算机技术的发展，移动通信技术得到了迅速发展。随着其应用领域的扩大和对性能要求的提高，促使移动通信在技术上和理论上向更高水平发展。20 世纪 80 年代以来，移动通信已成为现代通信网中不可缺少并发展最快的通信方式之一。

1.2 移动通信的发展历程

1897 年意大利科学家 M. G 马可尼在赫兹实验的基础上成功实现了陆地和一只拖船之间利用无线电波进行信息传输，证明了在移动体之间以无线方式进行通信的可行性。但在此后相当长的一段时间内，移动通信的发展一直相当缓慢，只在短波的几个频段上开发出了专用移动通信系统，而且一般只用于军队和政府部门。但在近十几年以来，移动通信的发展极为迅速，已广泛应用于国民经济的各个领域和人民的日常生活中。移动通信的发展大致经历了以下几个发展阶段。

1.2.1 第一代模拟蜂窝移动通信系统

20 世纪 80 年代发展起来的模拟蜂窝移动电话系统，人们把它称为第一代移动通信系统。这是一种以微型计算机和移动通信相结合，以频率复用、多信道共用技术和全自动地接

入公共电话网的小区制、大容量蜂窝式移动通信系统,在美国、日本和瑞典等国家先后投入使用。其主要技术是模拟调频、频分多址,主要业务是电话。代表这一系统的有:

AMPS (Advanced Mobile Phone Service) 系统称为先进的移动电话系统,是美国贝尔实验室于 1969 年开始研究,1978 年研制结束,1979 年在芝加哥城组网试用,1983 年投入使用。其工作频段为 800MHz,频率间隔为 30kHz,基站发射功率为 45W。

TACS (Total Access Communications System) 称为全向接续通信系统,是英国研制的通信系统,属 AMPS 系统的改进型。1982 年底开始研究,1985 年研制成功。其使用频段为 900MHz,信道间隔为 25kHz,基站发射功率为 40W。

NMT (Nordic Mobile Telephone) 系统称为北欧移动电话,该系统由丹麦、芬兰、挪威,瑞典于 1970 年开始研究,1981 年研制成功并投入使用,其工作频段为 450MHz,信道间隔为 25kHz,基站发射功率为 25 ~ 50W。利用 180 个双向信道,但容量很快饱和。接着 1986 年末引入 NMT900,工作在 900MHz 频段,有 1999 个双向信道,频率间隔为 12.5kHz。

模拟系统的主要缺点是:频谱利用率低,容量有限,系统扩容困难;制式太多,互不兼容,不利于用户实现国际漫游,限制了用户覆盖面;不能与 ISDN 兼容,提供的业务种类受限制,不能传输数据信息;保密性差,以及移动终端要进一步实现小型化、低功耗、低价格的难度都较大。

1.2.2 第二代数字蜂窝移动通信系统

第二代数字蜂窝移动通信系统是以数字信号传输、时分多址 (TDMA, Time Division Multiple Access)、码分多址 (CDMA, Code Division Multiple Access) 为主体技术,频谱效率提高,系统容量增大,易于实现数字保密、通信设备的小型化和智能化,标准化程度大大提高等。制定了更加完善的呼叫处理和网络管理功能,克服了第一代移动通信系统的不足之处,可与窄带综合业务数字网相兼容,除了传送语音外,还可传送数据业务,如传真和分组的数据业务等。

1.2.2.1 数字蜂窝移动通信系统

为了克服第一代模拟蜂窝移动通信系统的局限性,北美、欧洲和日本自 20 世纪 80 年代中期起相继开发第二代全数字蜂窝移动通信系统。各国根据自己的技术条件和特点确定了各自的开发目标和任务,制定了各自不同的标准,有欧洲的全球移动通信系统 (GSM, Global System for Mobile Communication),北美的 D-AMPS 和日本的个人数字蜂窝系统 (JDC)。由于各国采用的制式不同,所以网络不能相互兼容,从而限制了国际联网和漫游的范围。

对欧洲来说首要问题是要统一制式,建立一个全欧统一的数字蜂窝移动通信系统,新的数字蜂窝系统均采用统一的 GSM 体制。GSM 系统的主要目标是与迅速发展的 ISDN 网实现兼容,具有 ISDN 的一切功能改善了网络结构,提高了用户的保密性。

美国由于已建有大量的 AMPS 模拟系统,从美国的用户发展趋势分析,用户数急剧增长主要集中在纽约和洛杉矶等一些大城市,这些城市模拟移动通信系统面临容量饱和,而美国广大的中小城市并不存在这个问题。为此美国开发数字蜂窝移动通信系统的主要任务是:解决一些大城市移动通信发展的需求而采用数模兼容的方案,可以在不需要另辟新的频段的情况下解决扩容的问题。双模式的移动台需要在数模两种信道上进行通信的能力,提供双模式业务。

日本开发数字蜂窝系统的背景是本国现有模拟系统容量接近饱和,并考虑今后产品向国际市场开拓。因此它的开发方案是在西欧和北美数字移动通信技术迅速发展的形势下提出的。日本的调制、编码等制式向北美靠拢,但数模不能兼容,只是并存互通。

1.2.2.2 码分多址 (CDMA) 数字蜂窝移动通信系统

美国在数字蜂窝移动通信的起步较欧洲迟缓,但是在美国发展数字蜂窝移动通信时,却形成了一种多元化的倾向。除了制订了与欧洲类似的基于 TDMA 的 IS-54、IS-136 标准的数字网络,美国一些公司还在研究其他技术方案,Qualcomm (高通) 公司提出了一种采用码分多址 (CDMA) 方式的数字蜂窝系统的技术方案。1992 年 Qualcomm (高通) 公司向 CTIA 提出了码分多址的数字蜂窝通信系统的建议和标准。该建议于 1993 年被 CTIA 和 TIA 批准为中期标准 IS-95。IS-95 也是兼容 AMPS 模拟制式的双模标准。1996 年,CDMA 系统投入运营。

与其他蜂窝系统比较,码分多址 (CDMA) 数字蜂窝移动通信系统具有以下特点:

- 1) 系统容量大: 为 GSM 的 5.6 倍, TACS 的 11.2 倍;
- 2) 抗衰落能力及抗干扰性能强;
- 3) 语音质量高;
- 4) 保密性及安全性优于 GSM 系统;
- 5) 移动台发射功率低 (约 10mW);
- 6) 具有软切换和软容量特性;
- 7) 频率复用模式可达到 1, 本区和邻区可共用同一信道, 因而不需要频率动态分配;
- 8) 可实现宽带数据传输。

四种数字移动通信系统的主要技术参数如表 1-1 所示。

表 1-1 四种数字移动通信系统的主要技术参数

参 数	欧洲 GSM/DCS	美 国		日本 JDC
		D-AMPS	CDMA	
工作频段/kHz	890 ~ 915	824 ~ 849	824 ~ 849	810 ~ 826
	935 ~ 960	869 ~ 894	869 ~ 894	940 ~ 956
	1710 ~ 1785	1900		1429 ~ 1453
	1805 ~ 1880			1477 ~ 1501
射频间隔/kHz	200	30	1250	50
接入方式	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA	CDMA/FDMA	TDMA/FDMA
与现有模拟系统的 兼容能力	无	有	有	有
每频道业务信道数	8	3	61	3
	16	6		6

1.2.3 第三代数字蜂窝移动通信系统

第二代数字蜂窝移动通信系统只能提供语音和低速数据 ($\leq 9.6\text{ kbit/s}$) 业务的服务。但是在信息时代, 图像、语音和数据相结合的多媒体业务和高速率数据业务的业务量将会大大增加。

为了满足更多更高速率的业务以及更高频谱效率的要求,同时减少目前存在的各大网络之间的不兼容性,一个世界性的标准——未来公用陆地移动电话系统 FPLMTS (Future Public Land Mobile Telephone System) 应运而生,1995 年,又更名为国际移动通信 2000 (IMT-2000)。IMT-2000 支持的网络被称为第三代移动通信系统,简称 3G。第三代移动通信系统 IMT-2000 为多功能、多业务和多用途的数字移动通信系统,是在全球范围内覆盖和使用的。它根据特定的环境提供从 144kbit/s 到 2Mbit/s 的个人通信业务,支持全球无缝漫游和提供宽带多媒体业务。为了在未来的全球化标准中占据一席之地,各个国家、组织和公司纷纷提出自己的建议和标准,被 ITU 接受的候选标准多达 10 种之多。其中欧洲提出的 WCDMA 和北美提出的 cdma2000 最为大家看好;中国提出的 TD-SCDMA 由于得到了中国政府和产业界的支持,加之中国巨大的市场潜力,因此也格外引人注目。10 种第三代数字移动通信系统的无线传输技术方案的主要技术参数如表 1-2 所示。

表 1-2 10 种第三代数字移动通信系统的无线传输技术方案的主要技术参数

序 号	提交技术	双工方式	应用环境	多址技术	提交者
1	J: WCDMA	FDD、TDD	所有环境	CDMA	日本: ARTB
2	ETSI-UTRA-UMTS	FDD、TDD	所有环境	CDMA	欧洲: ETSI
3	WIMS WCDMA	FDD	所有环境	CDMA	美国: TIA
4	WCDMA/NA	FDD	所有环境	CDMA	美国: T1P1
5	Global CDMA II	FDD	所有环境	CDMA	韩国: TTA
6	TD-SCDMA	TDD	所有环境	CDMA	中国: CATI
7	cdma2000	FDD、TDD	所有环境	CDMA	美国: TIA
8	Global CDMA I	FDD	所有环境	CDMA	韩国: TTA
9	UWC-136	FDD	所有环境	CDMA	美国: TIA
10	EP-DECT	TDD	所有环境	CDMA	欧洲: ETSI

1.2.4 第四代数字移动通信系统

第四代移动通信系统(4G)标准比第三代标准具有更多的功能。第四代移动通信系统可以在不同的固定、无线平台和跨越不同频带的网络中提供无线服务,可以在任何地方宽带接入互联网(包括卫星通信),能够提供除信息通信之外的定位定时、数据采集、远程控制等综合功能,是多功能集成的宽带移动通信系统或多媒体移动通信系统。第四代移动通信系统应该比第三代移动通信系统更接近个人通信。

1.3 移动通信的电波传播

任何一个通信系统,信道是必不可少的组成部分。信道按传输介质分为有线信道和无线

信道。有线信道包括架空明线、电缆和光纤；无线信道中有中、长地表面波传播，短波电离层反射传播，超短波和微波直射传播以及各种散射传播。根据信道特性参数随外界各种因素的影响而变化的快慢，通常分为“恒参信道”和“变参信道”。所谓“恒参信道”是指其传输特性的变化量极微且变化速度极慢。“变参信道”与此相反，其传输特性随时间的变化较快。移动信道为典型的“变参信道”。

移动通信中的传播方式主要有直射波、反射波和地表面波等传播方式。移动台接收点的场强，一般是直射波、反射波和地表面波的合成，但由于地表面波的传播损耗随着频率的增高而增大，传播距离有限，所以在分析移动通信信道时，主要考虑直射波和反射波的影响。典型的移动信道电波传播路径如图 1-1 所示。

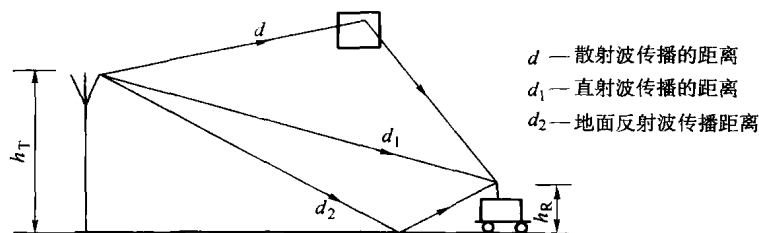


图 1-1 典型的移动信道电波传播路径

1.3.1 直射波

在自由空间中，电波沿直线传播而不被吸收，也不发生反射、折射和散射等现象而直接到达接收点的传播方式称为直射波传播。直射波传播损耗可看成自由空间的电波传播损耗 L_{bs} （单位为 dB）， L_{bs} 的表示式为

$$L_{bs} = 32.45 \text{ dB} + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (1-1)$$

式中， d 为距离（km）； f 为工作频率（MHz）。

由上式可见，自由空间中电波传播损耗（亦称衰减）只与工作频率 f 和传播距离 d 有关。当 f 或 d 增大一倍时， L_{bs} 将分别增加 6dB。

1.3.2 视距传播的极限距离

由于地球是球形的，凸起的地表面会挡住视线。视线所能到达的最远距离称为视线距离，简称视距，用 d_0 表示（如图 1-2 所示）。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_T 和 h_R （单位为 m），理论上可得视距传播的极限距离 d_0 （单位为 km）为

$$d_0 = 3.57 (\sqrt{h_R} + \sqrt{h_T}) \quad (1-2)$$

由此可见，视距决定于收、发天线的高度。天线架设越高，视线距离越远。

实际上当考虑了空气的不均匀性对电波传播轨迹

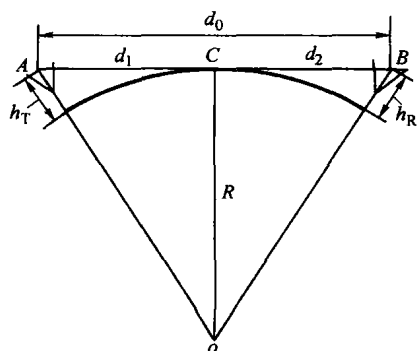


图 1-2 视距传播的极限距离

的影响后,在标准大气折射情况下,等效地球半径为 $R = 8500\text{km}$,可得修正后的视距传播的极限距离 d_0 (单位为 km) 为

$$d_0 = 4.12(\sqrt{h_R} + \sqrt{h_T}) \quad (1-3)$$

1.3.3 绕射损耗

在实际情况下,电波的直射路径上存在各种障碍物,除了考虑在自由空间中的视距传输损耗外,还应考虑各种障碍物对电波传输所引起的损耗,通常将这种由障碍物引起的附加传播损耗称为绕射损耗。

设障碍物与发射点和接收点的相对位置如图 1-3 所示,图中 x 表示障碍物顶点 P 至直射线路 TR 的距离,称为菲涅尔余隙。规定阻挡时余隙为负,如图 1-3a 所示;无阻挡时余隙为正,如图 1-3b 所示。由障碍物引起的绕射损耗与菲涅尔余隙的关系如图 1-4 所示。图中纵坐标为绕射引起的附加损耗,即相对于自由空间传播损耗的分贝数。横坐标为 x/x_1 ,其中 x_1 是第一菲涅尔区在 P 点横截面的半径,它由下列关系式可求得:

$$x_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1-4)$$

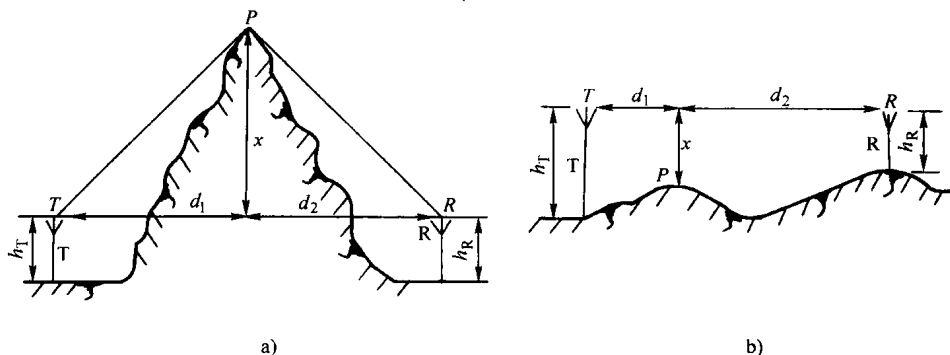


图 1-3 菲涅尔余隙

a) 负余隙 b) 正余隙

由图 1-4 可见,当 $x/x_1 > 0.5$ 时,附加损耗约为 0dB ,即障碍物对直射波传播基本上没有影响。为此在选择天线高度时,根据地形尽可能使服务区内各处的菲涅尔余隙 $x > 0.5x_1$;当 $x < 0$,即直射线路低于障碍物顶点时,损耗急剧增加;当 $x = 0$ 时,即 TR 直射线路从障碍物顶点擦过时,附加损耗约为 6dB 。

例 1-1 如图 1-3a 所示的传播路径中,菲涅尔余隙 $x = -82\text{m}$, $d_1 = 5\text{km}$, $d_2 = 10\text{km}$,工作频率为 150MHz ,试求出电波传播损耗 L 。

解 先由式 (1-1) 求出自由空间传播的损耗 L_{bs} 为

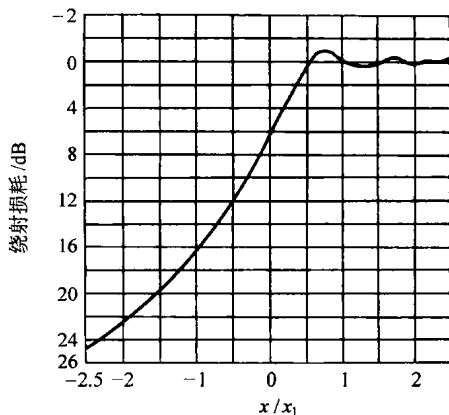


图 1-4 由障碍物引起的绕射损耗与菲涅尔余隙之间的关系

$$L_{bs} = 32.45\text{dB} + 20\lg(5 + 10)\text{dB} + 20\lg 150\text{dB} = 99.5\text{dB}$$

由式 (1-4) 求第一菲涅尔区半径 x_1 为

$$x_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{2 \times 5 \times 10^3 \times 1 \times 10^4}{15 \times 10^3}} \text{m} = 81.7\text{m}$$

由图 1-4 查得附加损耗 ($x/x_1 \approx -1$) 为 17dB, 所以电波传播的损耗 L 为

$$L = L_{bs} + 17\text{dB} = 99.5\text{dB} + 17\text{dB} = 116.5\text{dB}$$

1.3.4 反射波

电波在传播过程中, 遇到两种不同介质的光滑界面时, 就会发生反射现象。从发射天线到接收天线的电波由反射波和直射波的组成情况如图 1-5 所示。反射波与直射波的行距差为

$$\Delta d = a + b - c = \frac{2h_T h_R}{d_1 + d_2} \quad (1-5)$$

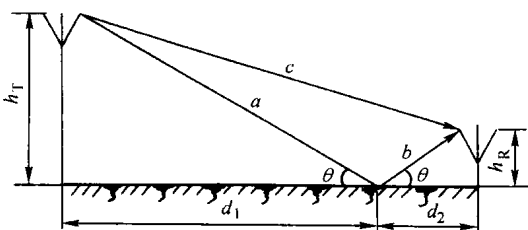


图 1-5 反射波和直射波的组成

由于直射波和反射波的起始相位是一致的, 因此两路信号到达接收天线的时延差换算成相位差 $\Delta\phi_0$ 为

$$\Delta\phi_0 = \frac{\Delta t}{T} \times 2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \quad (1-6)$$

再加上地面反射时大都要发生一次反相, 实际的两路电波相位差 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \pi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d + \pi \quad (1-7)$$

1.3.5 多径效应与瑞利损耗

设发射机发出 $A\cos\omega_c t$ 信号后, 接收机接收端收到的合成信号为

$$R(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t) \cos\{\omega_c[t - \tau_i(t)]\} = \sum_{i=1}^n R_i(t) \cos\{\omega_c t + \phi_i(t)\} \quad (1-8)$$

式中, $R_i(t)$ 为第 i 条路径的接收信号; $\tau_i(t)$ 为第 i 条路径的传输时间; $\phi_i(t)$ 为第 i 条路径的相位滞后, $\phi_i(t) = -\omega_c \tau_i(t)$ 。

经大量观察表明, $R_i(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 随时间的变化与发射信号的载频周期相比, 通常要缓慢得多, 所以 $R_i(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 可以认为是缓慢变化的随机过程, 故式 (1-8) 可以写成

$$R(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t) \cos\phi_i(t) \cos\omega_c t - \sum_{i=1}^n R_i(t) \sin\phi_i(t) \sin\omega_c t \quad (1-9)$$

设

$$x_c(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t) \cos\phi_i(t)$$

$$x_s(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t) \sin\phi_i(t)$$

则式(1-9)可写成

$$R(t) = x_c(t) \cos \omega_c(t) - x_s(t) \sin \omega_c(t) \quad (1-10)$$

设 $U(t)$ 为合成波 $R(t)$ 的包络, $\phi(t)$ 为合成波 $R(t)$ 的相位, 则

$$U(t) = \sqrt{x_c^2(t) + x_s^2(t)}$$

$$\phi(t) = \arctan \frac{x_s(t)}{x_c(t)}$$

由于 $R_i(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 随时间的变化与发射信号的载频周期相比是缓慢的, 因此 $x_c(t)$ 、 $x_s(t)$ 及包络 $U(t)$ 、相位 $\phi(t)$ 也是缓慢变化的。通常 $U(t)$ 满足瑞利分布, 相位 $\phi(t)$ 满足均匀分布, $R(t)$ 可视为一个窄带过程。假设噪声为高斯白噪声, σ 为噪声方差, r 为接收信号的损失幅度, 则包络概率密度函数 $p(r)$ 和相位概率密度函数 $p(\theta)$ 分别为

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad 0 \leq r \leq +\infty \quad (1-11)$$

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi} \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (1-12)$$

由式(1-11)得出瑞利损耗的均值 r_{mean} 和方差 σ_r^2 如下:

均值

$$r_{\text{mean}} = E[r] = \int_0^{\infty} r p(r) dr = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1.2533\sigma$$

方差

$$\sigma_r^2 = E[r^2] - E^2[r] = \int_0^{\infty} r^2 p(r) dr - \frac{\sigma^2 \pi}{2} = \sigma^2 (2 - \frac{\pi}{2}) = 0.4292\sigma^2$$

1.4 移动信道中的干扰

在移动通信系统中, 基站 (BS, Base Station) 与用户之间必须依靠无线电波来传送信息, 通信的质量取决于电波传播的条件。当前公用蜂窝移动通信系统的频率范围主要在特高频 (UHF, 300 ~ 3000 MHz) 内。这个频段的特点是: 传播距离在视距范围内, 通常为几十千米; 天线较短; 以地表面波、直射波和散射波等方式传播; 受地形地物影响较大。由于信道间隔与带宽比值不大, 当某一电台所接收的有用信号低到某一极限值, 而另一部相邻信道的移动台在这个电台附近工作时, 就会造成电磁干扰。在移动通信中, 考虑较多的是邻道干扰、同信道干扰、互调干扰、远近效应、码间干扰等。

1.4.1 邻道干扰

邻道干扰是指相邻或邻近信道之间的干扰。在多信道移动通信系统中, 当移动台靠近基站时, 移动台发信机的调制边带扩展, 会对正在接收微弱信号的基站邻道收信机形成干扰。由于这种干扰分量落在被干扰的接收机通频带内, 因而提高接收机的选择性也无济于事。一般说来, 二者相距越近, 路径传播损耗越小, 邻道干扰则越大。当移动台相互靠近时, 这些移动台发信机的调制边带扩展会给接收信号的众多移动台邻道接收机造成干扰。而基站发信机对移动台接收机的邻道干扰一般不严重, 这是因为基站发信机功率很大, 其调制边带扩展相对小得多, 移动台接收机收到的信号功率远远大于邻道干扰