

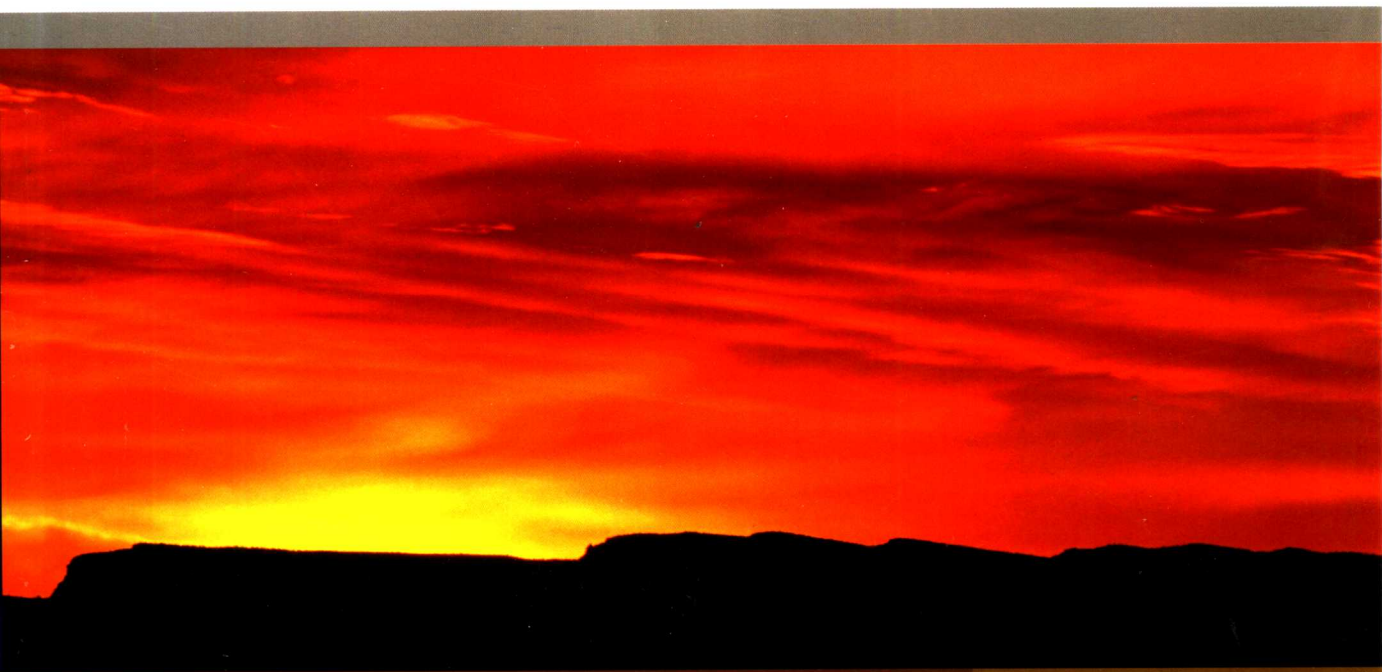
现代通信新技术系列教材



移动通信环境

理论基础·分析方法和建模技术

杨大成 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代通信新技术系列教材

移动传播环境

理论基础·分析方法和建模技术

杨大成 等编著



机械工业出版社

本书内容包括：理论分析移动传播环境所常用的概率论、随机过程及矩阵等基础知识；地球表面均匀大气中的电波传播、室外传播模型，室内无线传播及覆盖，小尺度衰落信道，标量信道建模及其仿真，矢量信道建模及其仿真等。

书中专门介绍了空-时矢量信道模型、多输入-多输出（MIMO）信道模型，使读者既便于对无线传播环境的基本概念和理论的理解，也能深刻感受到移动传播环境分析方法的演进。此外，本书附录列出了一些常用信道模型的建模、仿真源代码，以方便读者参考。

本书内容详实，在技术上有较高的参考价值，适合于从事电信工作的工程技术及研究人员使用，并可作为高等院校通信专业的教学用书或参考书。

图书在版编目（CIP）数据

移动传播环境：理论基础、分析方法和建模技术/杨大成等编著. —北京：机械工业出版社，2003.8

（现代通信新技术系列教材）

ISBN 7-111-12964-4

I. 移… II. 杨… III. 移动通信—教材
IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 075056 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：吉 玲 封面设计：陈 沛

责任印制：路 琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·18.75 印张·463 千字

0 001—4 000 册

定价：30.00 元

编辑信箱：jiling@mail.machineinfo.gov.cn

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

电波传播的特性是研究任何移动通信系统首先要遇到的问题。移动传播环境的特性不仅是所有移动通信理论研究的基础,也更直接关系到工程设计中通信设备的能力、天线高度的确定、通信距离的计算,以及为实现优质可靠的通信所必须采用的技术措施等一系列系统设计问题。并且,对于移动通信系统的移动信道环境而言,其信道环境远比固定移动通信的信道环境更为复杂,因而不能简单地用固定移动通信的电波传播模式来分析,必须根据移动通信的特点,按照不同的传播环境和地理特征进行分析和仿真。

本书作者在其多年从事移动通信技术领域内研究和开发基础上,结合丰富的实践经验,围绕移动传播环境的基本理论和对移动传播环境的特征、建模等方面的深刻理解撰写了本书。本书首先简明扼要地介绍了移动传播环境理论分析等方面常用的概率论、随机过程及矩阵等基础理论;然后,全面系统地讲述了地球表面均匀大气中的电波传播、室外传播模型、室内移动传播及覆盖、小尺度衰落信道、标量信道建模及其仿真和矢量信道建模及其仿真等。

值得一提的是,本书在内容选取和章节安排上,一方面按照大尺度传播模型和小尺度传播模型的分类方法,详细地阐述了移动传播环境的特征、基本理论和分析方法。另一方面随着对无线信道研究的深入,尤其是第三代移动通信系统对移动传播环境分析的要求,我们分别从室外传播环境和室内传播与覆盖,以及标量信道和矢量信道等角度对移动传播环境进行了分析、建模和仿真,给出了大量仿真结果和实例。而且专门介绍了空-时矢量信道模型,多输入-多输出(MIMO)信道模型。这样既便于读者对移动传播环境基本概念和理论的理解,也能深刻感受到移动传播环境分析方法的演进。此外,本书附录列出了一些常用的信道模型的建模,仿真源代码,以供参考。

本书内容丰富全面,论述系统深入,它将有助于我国移动通信领域的工程技术和研究人员,以及高等院校师生正确理解和具体掌握移动传播环境的特征、基本分析方法、建模及仿真技术等。书中也比较详细地介绍了一些关于移动传播环境在移动通信工程设计中的应用和具体方法,比较适合于移动通信网络规划和优化的应用。

本书第1章由付景兴、陈泽强、何琳琳、古建、周华、常永宇编写,第2章由晋云根、黄莉莉、何琳琳、程宇编写,第3章由杨大成、黄莉莉、常耀中、晋云根、王亚峰编写,第4章由黄莉莉、马敏、何琳琳、郝峻琳、张欣编写,第5章由秦贤菊、常耀中、陈泽强、付景兴、张蕾编写,第6章由石谊娜、付景兴、孟松、杨世敬、张定业、蔡启明编写,第7章由马敏、段勇、欧阳晖、孟松编写,第8章由崔盛山、付景兴、陈泽强编写。

鉴于时间仓促、作者水平有限,也鉴于目前移动传播环境理论等方面尚有许多理论分析和技术问题有待于研究和解决,因此本书中难免有疏漏甚至不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第1章 绪论	1
1.1 移动通信的发展概况	1
1.2 移动通信的特点	2
1.2.1 移动通信的传播媒介的特点	2
1.2.2 移动通信的传播环境是复杂的干扰环境	3
1.2.3 移动通信的频谱资源非常有限	4
1.2.4 移动通信系统的容量	4
1.3 无线信道研究的发展历程	4
1.3.1 独立信道	4
1.3.2 时间相关信道	4
1.3.3 空间相关信道	4
1.4 无线信道的主要性能指标	5
1.4.1 离散信道的信道容量	5
1.4.2 连续信道的信道容量	6
1.4.3 MIMO 信道的容量	6
1.5 信道的加性噪声	7
1.6 建立信道模型的重要意义	7
参考文献	8
第2章 基础知识	9
2.1 引言	9
2.2 概率论初步	9
2.2.1 概率论的基本概念	9
2.2.2 条件概率、边缘概率与联合概率	10
2.2.3 随机变量、概率分布与概率密度	11
2.2.4 常用的概率分布	14
2.2.5 特征函数	16
2.2.6 中心极限定理与契比雪夫不等式	17
2.3 随机过程的基本知识	19
2.3.1 随机过程的定义	19
2.3.2 随机过程的数字特征	19
2.3.3 平稳随机过程	20
2.3.4 平稳随机过程的相关函数与功率谱密度	21
2.3.5 常用的随机过程	22

2.4 线性代数基础.....	26
2.4.1 基本概念	26
2.4.2 广义逆矩阵	28
2.4.3 矩阵特征值问题	30
2.4.4 矩阵的几种分解	31
2.4.5 矩阵的 Kronecker 积	33
参考文献.....	34
第3章 地球表面均匀大气中的电波传播.....	35
3.1 引言.....	35
3.2 自由空间的传播.....	36
3.3 反射.....	38
3.3.1 电介质的反射	38
3.3.2 理想导体的反射	39
3.3.3 地面反射（双径）模型	39
3.4 绕射.....	42
3.4.1 菲涅尔区域	42
3.4.2 刃形边缘传播	44
3.4.3 多重刃形绕射	46
3.5 散射.....	47
3.6 阴影衰落及地形影响.....	47
3.6.1 阴影衰落的统计特性	47
3.6.2 地形因子模型	50
3.6.3 树木因子模型	61
参考文献.....	68
第4章 室外传播模型.....	70
4.1 室外无线传播概述.....	70
4.2 室外宏蜂窝传播模型.....	72
4.2.1 Longley-Rice 模型	72
4.2.2 Durkin 模型	74
4.2.3 Okumura 模型	76
4.2.4 Hata 模型.....	81
4.2.5 Walfisch-Bertoni 模型及其扩展.....	83
4.2.6 LEE 模型	86
4.2.7 Egli 传播模型.....	88
4.2.8 Carey 传播模型.....	88
4.2.9 Bertoni-Xia 模型	88
4.2.10 TIREM 模型.....	89
4.3 室外微蜂窝传播模型.....	89
4.3.1 双线模型	89

4.3.2 经验模型	91
4.3.3 准三维 UTD 模型	92
4.3.4 LEE 微蜂窝模型	93
4.3.5 宽带 PCS 微蜂窝模型	96
4.4 混合室内-室外传播模型 (曼哈顿模型)	97
4.5 室外传播环境的测量	98
参考文献	102
第 5 章 室内无线传播及覆盖	105
5.1 室内无线传播概述	105
5.1.1 室内无线传播的基本特点	105
5.1.2 室内无线传播研究的概述	106
5.1.3 室内电磁波的传播	106
5.1.4 室内无线传播的研究及发展	109
5.2 室内无线信道	110
5.2.1 室内信道和传统移动信道的比较	110
5.2.2 室内无线信道的主要参数及信道模型	110
5.2.3 常用的计算和测量参数	118
5.3 室内无线传播模型	121
5.3.1 经验模型	122
5.3.2 确定性模型	128
5.4 室内覆盖系统	139
5.4.1 建设室内覆盖系统的原因	139
5.4.2 室内覆盖系统的特点及组成	140
5.4.3 室内覆盖系统的建设和评估	146
参考文献	149
第 6 章 小尺度衰落信道	151
6.1 衰落和多径	151
6.1.1 衰落和多径的物理模型	151
6.1.2 衰落的数学模型	153
6.2 移动多径信道参数	156
6.2.1 时间色散参数 (频率选择性)	158
6.2.2 频率色散参数 (时间选择性)	161
6.2.3 角度色散参数 (空间选择性)	163
6.2.4 衰落信道的包络统计特性	167
6.2.5 衰落信道的二阶统计特性	169
6.3 小尺度衰落信道分类	172
6.3.1 平坦衰落信道和频率选择性衰落信道	172
6.3.2 快衰信道和慢衰信道	174
6.3.3 标量信道和矢量信道	175

参考文献.....	177
第 7 章 标量信道建模及其仿真.....	178
7.1 平坦衰落信道建模.....	178
7.1.1 平坦衰落信道理论模型.....	178
7.1.2 多普勒功率谱.....	182
7.2 平坦衰落信道仿真 ^[13]	187
7.2.1 正弦波叠加法.....	188
7.2.2 成形滤波器法.....	228
7.3 频率选择性衰落信道建模 ^[13]	230
7.4 频率选择性衰落信道仿真.....	234
参考文献.....	237
第 8 章 矢量信道的建模及仿真.....	239
8.1 建立矢量信道模型的意义及现有模型总结.....	239
8.2 矢量信道的统计特性.....	244
8.2.1 理论模型及基本假设.....	244
8.2.2 空间相关性和空时选择性信道.....	245
8.3 基于(散射体)几何分布的单反射椭圆模型(GBSBEM).....	250
8.3.1 GBSBEM 简介.....	250
8.3.2 GBSBEM 的多普勒频谱特性.....	253
8.4 多输入多输出(MIMO)信道.....	256
8.4.1 MIMO 信道建模.....	256
8.4.2 MIMO 信道模型.....	261
8.4.3 MIMO 信道模型仿真.....	262
参考文献.....	270
附 录.....	273
附录 A 正弦波叠加法.....	273
附录 B 成形滤波器法.....	280
附录 C 带有相关性 MIMO 信道仿真程序.....	282
附录 D 典型信道类型.....	285
附录 E 缩略语词汇.....	290
参考文献.....	292

第 1 章 绪 论

1.1 移动通信的发展概况

随着社会的发展,人们对通信的需求日益迫切,对通信的要求也越来越高。理想的目标是能在任何时候、任何地方、与任何人都能及时沟通联系、交流信息。显然没有移动通信,这种愿望是无法实现的。众所周知,移动通信是指通信的双方或至少有一方处在运动中进行信息传输和交换。而要任意进行移动,有线通信是完全不可行的,只有通过移动通信。因此移动通信是处于特殊环境——移动环境下的无线电通信。众所周知,无线信道是移动通信系统必不可少的组成部分。因而对无线信道和噪声的研究是移动通信研究的基础。

移动通信是当今通信领域内最为活跃和发展最为迅速的领域之一,也是将在 21 世纪对人类的和社会生活有重大影响的科学技术领域之一。

自从 1896 年马可尼发明无线电报以来,由于无线通信使用的灵活性,给用户带来了方便,用户可以随时随地地使用。近年来,无线通信,特别是移动通信,得到了迅猛的发展。

1946 年 AT&T 推出了第一个移动电话,采用的是 FM 方式,120kHz 带宽传输一路语音信号。

20 世纪 60 年代中期, Bell System 推出了 IMTS,采用 FM, 25~30kHz 带宽传输一路语音。

20 世纪 60 年代末、70 年代初开始出现了第一个蜂窝 (cellular) 电话系统,当时 Cellular 的意思是将一个大区域划分为几个小区 (cell),相邻的蜂窝区使用不同的频率进行传输,以免产生相互干扰。

20 世纪 70 年代末,由于半导体技术的发展和微处理器的出现,使蜂窝系统可以实现的复杂度大大提高,从而进一步推动了蜂窝移动通信技术的迅速发展。在这期间,美国推出了 AMPS 系统,欧洲推出了 TACS 系统等可向用户提供商业服务的模拟系统。

20 世纪 80 年代初,蜂窝移动通信系统已开始了真正的运营实验,实现真正意义的蜂窝移动通信;在此基础上,90 年代初各国又相继推出了今天称为第二代的数字移动通信系统的 DAMPS、GSM 和 IS-95 CDMA 系统。

20 世纪 90 年代中期以后,随着移动通信系统技术的成熟和运营实践的成功,以及计算机技术的飞速发展和迅速普及,对移动通信系统的业务功能又有了更高的要求,世界上许多国家相继开始研究第三代移动通信系统。

移动通信的发展过程及趋势概括如下:

- (1) 工作频段由短波、超短波、微波发展到毫米波、红外和超长波;
- (2) 频道间隔由 100kHz、50kHz、25kHz 发展到 12.5kHz 和宽带扩频信道;
- (3) 调制方式由振幅压扩单边带模拟调制发展到数字调制;

(4) 多址方式由频分多址 (FDMA)、时分多址 (TDMA)、码分多址 (CDMA) 发展到混合多址, 以及固定多址和随机多址的结合;

(5) 网络覆盖由蜂窝发展到微蜂窝、微微蜂窝和混合蜂窝;

(6) 网络服务范围由局部地区、大中城市发展到全国、全世界, 并由陆地、水上、空中发展到陆海空一体化;

(7) 业务类型由以通话为主, 发展到传送数据、传真、静止图像, 直到传输综合业务。

1.2 移动通信的特点

1.2.1 移动通信的传播媒介的特点

移动通信的用户由于要进行自由移动, 其位置不受束缚。所以必须利用无线电波进行传输, 但与有线传播媒介相比, 无线电波的传播特性一般都很差, 而且不同用户的传播信号在传播过程中还会互相干扰。因此建立无线传输系统远比有线系统复杂。首先, 移动通信的工作环境十分复杂, 电波不仅会随着传播的距离的增加而发生弥散损耗, 并且会受到地形、建筑物的遮蔽而发生“阴影效应”, 而且信号经过多点反射, 会从多条路径到达接收地点, 这种多径信号的幅度、相位和到达时间都不一样, 它们相互叠加会产生电平快衰落和时延扩展; 其次, 移动通信常常在快速移动中进行, 这不仅引起多普勒频移, 产生随机调频, 而且会使得电波传播特性发生快速的随机起伏。因此可以认为, 无线传播环境是一种随时间、环境和其他外部因素而变化的传播环境。

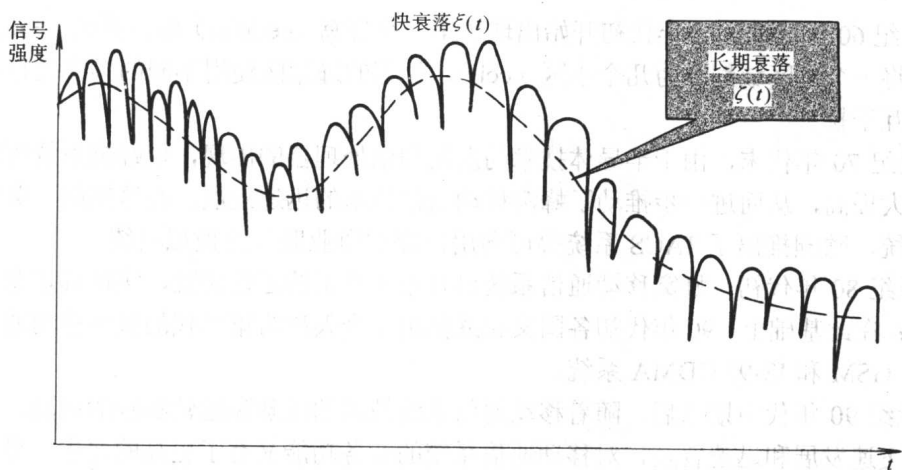


图 1-2-1 无线信道衰落示意图

通常, 无线信道的传播模型可分为大尺度 (Large-Scale) 传播模型和小尺度 (Small-Scale) 传播模型两种^[2]。大尺度模型主要用于描述发射机与接收机 (T-R) 之间长距离 (几百或几千米) 上的信号强度变化。小尺度模型用于描述短距离 (几个波长) 或短时间 (秒级) 内接收

信号强度的快速变化(见图 1-2-1)。但这两种模型并不是相互独立的,在同一个无线信道中,既存在大尺度衰落,也存在小尺度衰落。了解这些信道特性对于我们要在频谱资源有限的信道上,尽可能高质量、大容量传输有用信息起着指导性的作用。讨论大尺度传播不仅对分析信道的可用性、选择载波频率以及切换有重要意义,而且对于移动无线网络的规划也很重要;而讨论小尺度衰落则对传输技术的选择和数字接收机的设计至关重要。一般而言,大尺度表征了接收信号在一定时间内的均值随传播距离和环境的变化而呈现的缓慢变化,小尺度表征了接收信号短时间内的快速波动。因此,实际的无线信道衰落因子可表示为

$$\eta(t) = \xi(t) \times \zeta(t) \quad (1-2-1)$$

式中, $\eta(t)$ 表示信道的衰落因子; $\xi(t)$ 表示 Small-Scale 衰落; $\zeta(t)$ 表示大尺度衰落。

➤ 多径效应

在移动传播环境中,到达移动台天线的信号不是单一路径来的,而是许多路径众多反射波的合成。由于电波通过各个路径的距离不同,因而各路径来的反射波到达时间不同,相位也就不同。不同相位的多个信号在接受端叠加,有时同相叠加而加强,有时反相叠加而减弱。这样,接收信号的幅度将急剧变化,即产生衰落。这种衰落是由多径引起的,所以称为多径衰落。移动信道的多径衰落,可以从空间和时间两个方面来描述。从空间角度来看,沿移动台移动方向,接收信号的幅度随着距离变动而衰减。其中,本地反射物所引起的多径效应呈现较快的幅度变化,其局部均值为随距离增加而起伏的曲线,反映了地形起伏所引起的衰落以及空间扩散损耗。从时间上来看,各个路径的长度不同,因而信号到达的时间就不同。这样,如从基站发送一个脉冲信号,则接收信号中不仅包含该脉冲,而且还包含它的各个时延信号。这种由于多径效应引起的接收信号中脉冲的宽度扩展的现象,称为时延扩展。

➤ 多普勒效应

由于移动台与基站之间的相对运动引起的,或是由信道路径中物体的运动引起的,引起多普勒频移,从而引起多普勒扩展(频率色散),造成信道的时变特性,也就是信道出现了时间选择性衰落。时间选择性衰落会造成信号失真,这是由于发送信号还在传输的过程中,传输信道的特征已经发生了变化。信号尾端时的信道的特性与信号前端时的信道特性已经发生了变化。如果信号持续的时间比较短,在这个比较短的持续时间内,信道的特性还没有比较显著的变化,这时时间选择性衰落并不明显;当信号的持续时间进一步增加,信道的特性在信号的持续时间内发生了比较显著的变化时,就会使信号产生失真。信号的失真随着信号的持续时间的增长而增加。

1.2.2 移动通信的传播环境是复杂的干扰环境

除去一些常见的外部干扰,如天电干扰、工业干扰和信道噪声外,系统本身和不同系统之间,还会产生这样或那样的干扰。因为在移动通信系统中,常常有多部用户电台在同一地区工作,基站还会有多部收发信机在同一地点工作,这些电台之间会产生干扰。随着移动通信网所采用的制式不同,所产生的干扰也会不同。归纳起来说,这些干扰有邻道干扰、互调干扰、共道干扰、多址干扰,以及近地无用强信号压制远地有用弱信号的现象等等。因此在移动通信系统中,如何对抗和减少这些有害干扰的影响是至关重要的。

1.2.3 移动通信的频谱资源非常有限

移动通信由于不同传播路径之间相互干扰, 频谱资源非常有限, 而用户又越来越多。如何提高移动通信系统的通信容量, 始终是移动通信发展中的焦点。为了解决这一矛盾, 一方面要开辟和启用新的频段; 另一方面要研究各种新技术和新措施, 以压缩信号所占用的频带宽度和提高频谱的利用率。而这些所用的措施都是和传播环境有着必然的联系, 如果不了解无线传播环境的特点, 这些新技术和新措施都无从谈起。

1.2.4 移动通信系统的容量

早期的民用无线移动话音通信主要面向警用和出租车调度, 占用超高频频段。随着个人移动电话应用需求的增长, 使用了更高的甚高频频段。后来, 人们认识到应该更有效地使用无线频谱进行话音通信。

为了满足有限的频谱资源为更多的移动电话用户服务的需求, 引入了无线蜂窝系统的概念。蜂窝系统的主要特征为:

- (1) 通过控制发射功率使得频谱资源在一个大区中的不同小区间重复利用;
- (2) 通过将小区分割为更小的小区的方法来增大系统的容量。

1.3 无线信道研究的发展历程

1.3.1 独立信道

这种信道是最简单的信道, 也是最初研究通信系统最常用的。这种信道在时间和空间上都是独立的, 但是与实际情况相差得比较大, 是一种比较理想的信道。

1.3.2 时间相关信道

由于编码交织技术的应用, 使系统的传输性能有比较大的提高。这种信道就牵涉到了信道的时相关特性。信道的时相关性对编码性能有很大影响, 在实际的传输环境中, 信道的时采样值之间是存在着相关性的, 进行交织就是为了减少这种相关性, 从而更好地提高编码性能。时间上的独立信道不能反映这种相关性, 是一种理想的情况。

目前, 人们提出利用马尔可夫链来模拟这种相关性, 这种模拟还是比较符合实际的。

1.3.3 空间相关信道

目前, 由于多媒体、宽带 Internet 等高速率数据传输的业务迅猛增加, 对高速率数据无线接入的需求是无止境的, 而无线频谱资源相对匮乏。如何充分提高有限频谱资源的使用效率的问题摆在了我们的面前。而利用传统的办法增加系统容量的空间已很小, 而代价却很大。

由此就要寻求新的途径来提高无线通信系统的容量。利用多输入多输出 (MIMO) 方法为我们提供了新的研究方向, 即空间特性的应用。利用空间特性可以在不增加发射功率和占用带宽的条件下极大地提高数据传输速率。现在利用空间特性增加系统容量的方法主要有 BLAST 技术、空时码技术、分集技术和智能天线技术。

利用空间技术就要熟悉 MIMO 信道的空间特性, 而传统的信道都是描述单输入单输出信道或互相独立的 MIMO 信道。实际空间传输环境下的信道之间是相关的, 并且这种相关性对 MIMO 系统的性能至关重要, 因此空间矢量信道的研究、建模和仿真越来越成为研究通信系统性能必不可少的工具。

1.4 无线信道的主要性能指标

在评价无线信道和建立仿真信道模型时, 往往要涉及无线信道的主要性能指标, 否则就无法衡量其传播环境的优劣, 也就不能根据传播环境的特点而采用适合的传输技术。保证通信系统的性能而经济上又是可行的。

无线信道的性能指标主要包括无线信道的容量、时间相关性、空间相关性、相关时间、相关带宽、信道衰落深度和衰落速率。在这些性能指标中, 无线信道的容量是综合性的指标, 它描述的是在给定的信噪比和带宽条件下, 某一信道能可靠传输的传输速率极限。而其他参数能够决定信道容量的某一方面的特性。如时间相关性、信道衰落深度和衰落速率描述了信道容量随时间的变化关系, 空间相关性描述了信道容量随空间的变化关系。

1.4.1 离散信道的信道容量

离散信道模型如图 1-4-1 所示。

在图 1-4-1 中, $P(x_i)$ 表示发送符号 x_i 的概率, $P(y_i)$ 表示收到符号 y_i 的概率, $P(y_i/x_i)$ 是转移概率。这里 $i=1, 2, 3, \dots, n$, 表示所有可能的发送符号。

每符号平均信息量为

$$r = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) - \left[-\sum_{j=1}^n P(y_j) \sum_{i=1}^n P(x_i/y_j) \log_2 P(x_i/y_j) \right] \quad (1-4-1)$$

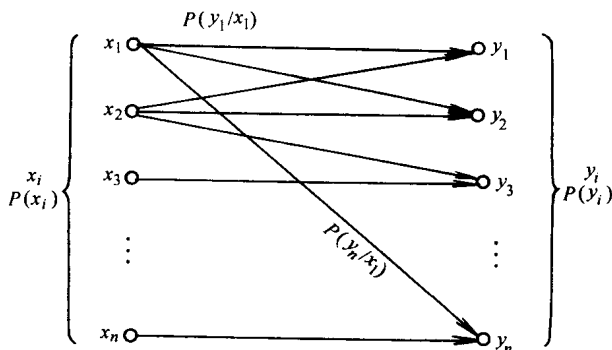


图 1-4-1 离散信道模型

单位时间内传输的平均信息量为

$$R = r * v \quad (1-4-2)$$

信道的容量为

$$C = \max_{\{P(x)\}} R \quad (1-4-3)$$

1.4.2 连续信道的信道容量

连续信道的仙农容量公式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad \text{bit/s} \quad (1-4-4)$$

式中, N 为输入信道的加性高斯白噪声功率; S 为信号的功率; B 为信道的带宽。这个公式表明了, 当信号与作用在信道上的起伏噪声的平均功率给定时, 在具有一定频带宽度 B 的信道上, 理论上单位时间内可能传输的信息量的极限数值。

它的另外一种表现形式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad \text{bit/s} \quad (1-4-5)$$

式中, n_0 为噪声功率谱密度。

由此可见, 一个连续信道的容量受 B 、 n_0 和 S 三个要素的约束, 只要这三个要素一确定, 则信道的容量就确定了。

1.4.3 MIMO 信道的容量

信息论已经证明, 当不同的接收天线和不同的发射天线之间互不相关时, MIMO 系统能够很好地提高系统的抗衰落和噪声性能, 从而获得巨大的容量, 例如: 当接收天线和发送天线数目都为 8 根, 且平均信噪比为 20dB 时, 链路容量可以高达 42bit/s/Hz, 这是单天线系统所能达到容量的 40 多倍。

MIMO 信道模型如图 1-4-2 所示。

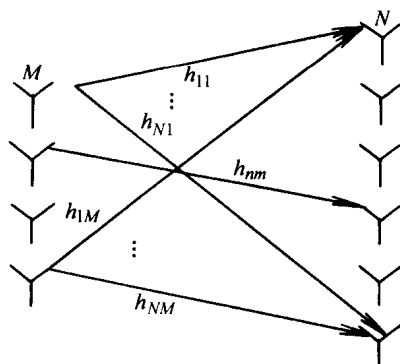


图 1-4-2 MIMO 信道模型

在等功率分配的前提下, MIMO 信道的仙农容量为

$$C = \log_2 \det \left[I + \frac{\rho}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right] \quad \text{bit/s/Hz} \quad (1-4-6)$$

式中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix}$$

ρ 为信噪比, N 为发送天线数, M 为接收天线数, h_{nm} 是从发送天线 n 到接收天线 m 之间的信道冲击响应。

1.5 信道的加性噪声

我们知道, 信道对信号的影响除了乘性干扰 (即衰落), 还包括加性干扰 (即加性噪声)。下面介绍一下信道中的加性噪声产生的原理。

信道中加性噪声的来源, 一般有三个部分: 即人为噪声、自然噪声和内部噪声。人为噪声来源于无关的其他信号源, 例如外台信号、开关接触噪声、工业的点火辐射及荧光灯干扰等; 自然噪声是指自然界存在的各种电磁波源, 例如闪电、大气中的电暴、银河系噪声及其他各种宇宙噪声等; 内部噪声是系统设备本身产生的各种噪声, 例如在电阻一类的导体中, 自由电子的热运动 (常称为热噪声)、真空管中电子的起伏发射和半导体中载流子的起伏变化 (常称为散弹噪声) 及电源哼声等。

某些类型的噪声是确知的, 例如电源哼声、自激振荡、各种内部的谐波干扰等。虽然消除这些噪声不一定很容易, 但至少在原理上可消除或基本消除。另一些噪声则往往不能准确预测其波形。这种不能预测的噪声通称为随机噪声。

常见的随机噪声可分为单频噪声、脉冲噪声和起伏噪声三类。单频噪声是一种连续波的干扰, 它可视为一个已调正弦波, 但其幅度、频率或相位是事先不能预知的。这种噪声的主要特点是占用极窄的频带, 但在频率轴的位置可以实测。因此单频噪声并不是在所有通信系统中都存在。脉冲噪声是在时间上无规则地突发的短促噪声, 例如工业上的点火辐射、闪电及偶然的碰撞和电气开关通断等产生的噪声。这种噪声的主要特点是其突发的脉冲幅度大, 但持续时间短, 且相邻突发脉冲之间往往有较长的安静时段。起伏噪声是以热噪声、散弹噪声及宇宙噪声为代表的噪声。这些噪声的特点是无论在时域内还是在频域内, 它们总是普遍存在和不可避免的。

1.6 建立信道模型的重要意义

无线信道是移动通信的传输媒体, 所有的信息都在这个信道中传输。信道性能的好坏直接决定着人们通信的质量, 因此要想在比较有限的频谱资源上尽可能地高质量、大容量传输有用的信息就要求我们必须十分清楚地了解信道的特性。然后根据信道的特性采取一系列的

抗干扰和抗衰落措施，来保证传输质量和传输的容量方面的要求。

为了研究 MIMO 通信技术，一个与实际传输环境相符合的无线 MIMO 信道仿真模型以及信道估计方法都是必需的。Lucent、Nokia、LSI Logic、Motorola 等国际通信公司以及 Stanford 等国外的大学和科研机构都在研究 MIMO 信道模型，其中 Lucent、Nokia、Motorola 向国际标准化组织 3GPP2 TSG-C WG5 提交了他们信道模型的建议。

参考文献

- 1 Theodore S. Rappaport . Wireless Communications Principles & Practice . Prentice-Hall Inc., 1996
- 2 樊昌信,詹道庸等 . 通信原理 (第四版) . 北京: 国防工业出版社, 1995
- 3 Stege M, Jelitto J, A multiple input-multiple output channel model for simulation of TX- and RX-diversity wireless system . IEEE VTC2000'fall. 2000: 833-839
- 4 Thomas Derryberry R., A MIMO Channel Model for 1x EV-DV Evaluation. 3GPP-C50-20010611-010, Nokia research center, June 11-15, 2001
- 5 杨大成等. cdma2000 1x 移动通信系统 . 北京: 机械工业出版社, 2003

第2章 基础知识

2.1 引言

信道是通信系统必不可少的组成部分,而通信信道的不理想使得信道中必然有噪声的存在。通信过程是信号和噪声通过通信系统的过程,因此,分析和研究通信系统,总离不开对信号和噪声的分析,离不开对信道的分析。通信系统中遇到的信号,通常总带有某种随机性,即它们的某一个或者几个参数不能预知或不能完全预知,我们把这种具有随机性的信号称为随机信号。通信系统中遇到的噪声,如自然界中的各种电磁波噪声和设备本身产生的热噪声、散粒噪声等,它们更无法预测。凡是不能预测的噪声就统称为随机噪声,或简称为噪声。

从统计数学的观点看,随机信号和噪声统称为随机过程。因此,统计数学中有关随机过程的理论可以运用到随机信号和噪声的分析中来,而随机过程理论又是以概率论知识为基础的。所以本章将介绍分析通信系统和通信信道所必需的内容,即概率论和随机过程的相关知识。

2.2 概率论初步

本节介绍深入了解无线信道特性所必需的概率论知识,并限于在以后各章直接使用的有关理论。由于本书不是专门论述概率论,所以只是对所涉及的知识进行简单介绍,不作具体推导。若想深入学习这方面知识可参考相关书籍。

2.2.1 概率论的基本概念

在自然界和社会上发生的现象很多,其中有一类现象是在一定条件下必然发生的,这类现象称为确定性现象;还有一类现象是在一定的条件下并不一定发生,但在相同条件下的多次试验的结果又具有统计规律性的现象,我们称之为随机现象。概率论与数理统计是研究随机现象的一门科学。

2.2.1.1 频率

设在相同的条件下,随机试验重复进行了 n 次。如果事件 A 出现了 n_A 次,事件 A 出现的次数 n_A 称为事件 A 出现的频数,比值 n_A/n 称为事件 A 出现的频率,记为 $f_n(A)$ 。

由定义可知频率具有如下性质:

$$0 \leq f_n(A) \leq 1 \quad (2-2-1)$$

$$f_n(S) = 1 \quad (2-2-2)$$

式中, S 表示随机试验的样本空间,即 n 次试验中所有可能事件的集合。

若 A_1 、 A_2 、 $\dots$ 、 A_k 是两两不相容的事件,则

$$f_n(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_k) = f_n(A_1) + f_n(A_2) + \dots + f_n(A_k) \quad (2-2-3)$$