



4G LTE 移动通信技术系列教程

网络规划与 优化技术

NETWORK PLANNING AND
OPTIMIZATION TECHNOLOGY

朱明程 王霄峻 © 主编
李建蕊 方朝曦 杨德相 张轲 © 副主编





4G LTE 移动通信技术系列教程

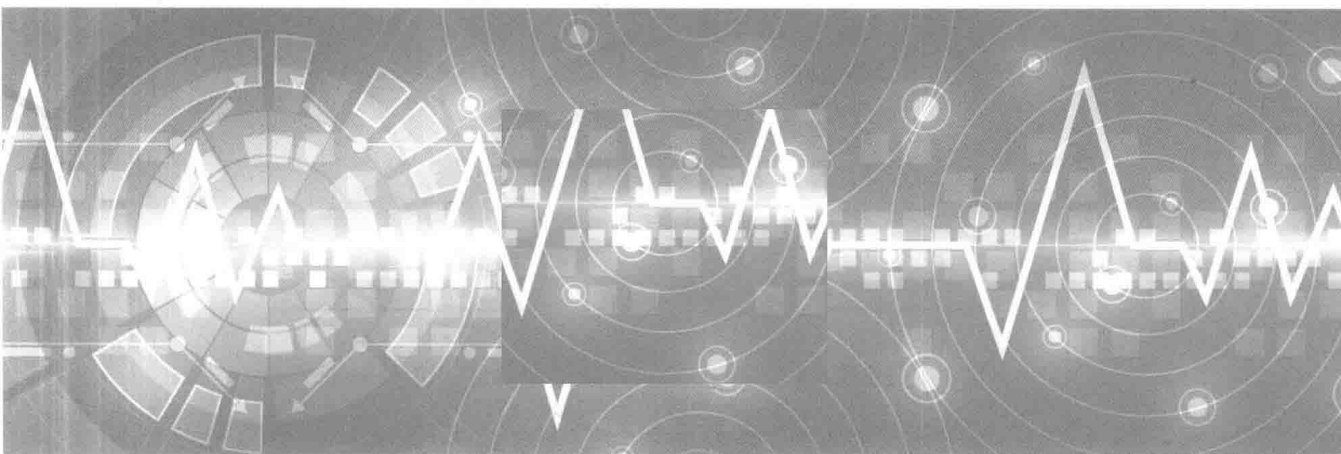
网络规划与 优化技术

◆
NETWORK PLANNING AND
OPTIMIZATION TECHNOLOGY

朱明程 王霄峻 © 主编

李建蕊 方朝曦 杨德相 张轲 © 副主编

◆



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

网络规划与优化技术 / 朱明程, 王霄峻主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2018.2
4G LTE移动通信技术系列教程
ISBN 978-7-115-47637-1

I. ①网… II. ①朱… ②王… III. ①第四代移动通信系统—网络规划—教材 IV. ①TN929.537

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第324755号

内 容 提 要

本书较为全面地介绍了无线传播基础知识、LTE 基本原理、LTE 网络规划与优化知识。全书共15章,分别讲述了无线传播理论、天线和馈线基础知识、移动通信的演进和LTE系统概述、LTE空中接口物理层、LTE信令与协议、LTE特性算法、LTE-A技术、LTE无线网络覆盖估算、基站勘测、电磁背景干扰测试、LTE小区参数规划、LTE单站验证、LTE RF优化、LTE覆盖问题分析和LTE切换问题分析等内容。书中还提供了在线学习的相关资源,帮助读者巩固所学内容。

本书可以作为高校通信工程、电子信息等专业相关课程的教材,也可以作为华为HCNA认证培训的教材,还可作为通信工程技术人员的参考用书。

-
- ◆ 主 编 朱明程 王霄峻
 - 副 主 编 李建蕊 方朝曦 杨德相 张 轲
 - 责任编辑 左仲海
 - 责任印制 马振武
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 17.75 2018年2月第1版
 - 字数: 504千字 2018年2月北京第1次印刷
-

定价: 49.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

“4G LTE移动通信技术系列教程”编委会

主任：宋铁成

副主任：朱明程 赵新胜 李世银 尉彦清 倪建军

周建勋 张立科

委员（按姓氏笔画排序）：

王春峰 王霄峻 卞璐 方朝曦 朱彤

李良 李建蕊 李晓滨 李海涛 杨福猛

杨德相 应祥岳 宋晓勤 张轲 陈启彪

陈国华 陈美娟 赵航 闻银 郭俐

当前,在云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能等新领域出现人才奇缺状况。习近平总书记指出:“我们对高等教育的需要比以往任何时候都更加迫切,对科学知识和卓越人才的渴求比以往任何时候都更加强烈”。国民经济与社会信息化和现代服务业的迅猛发展,对电子信息领域的人才培养提出了更高的要求,而电子信息类专业又是许多高等学校的传统专业、优势专业和主干专业,也是近年来发展最快、在校人数最多的专业之一。

为此,高校必须深化机制体制改革,推进人才培养模式创新,进一步深化产教融合、校企合作、协同育人,促进人才培养与产业需求紧密衔接,有效支撑我国产业结构深度调整、新旧动能接续转换。机制体制改革关键之一就是深入推进产学合作、产教融合、科教协同,通过校企联合制定培养目标和培养方案、共同建设课程与开发教程、共建实验室和实训实习基地、合作培养培训师资和合作开展研究等,鼓励行业企业参与到教育教学各个环节中,促进人才培养与产业需求紧密结合。要按照工程逻辑构建模块化课程,梳理课程知识点,开展学习成果导向的课程体系重构,建立工作能力和课程体系之间的对应关系,构建遵循工程逻辑和教育规律的课程体系。

由高校教学一线的教育工作者与华为技术有限公司、浙江华为通信技术有限公司的技术专家联合成立编委会,共同编写“4G LTE 移动通信技术系列教程”,将移动通信系统的基础理论与华为技术有限公司相关系列产品深度融合,构建完善的移动通信理论知识和工程技术体系,搭建基础理论到工程实践的知识桥梁,目标是培养具备扎实理论基础,从事工程实践的优秀应用型人才。

“4G LTE 移动通信技术系列教程”包括《移动通信技术》《网络规划与优化技术》《路由与交换技术》和《传输网络技术》四本教材,基本涵盖了通信系统的交换、传输、接入和通信等核心内容。系列教程有效融合华为技能认证课程体系,将理论教学与工程实践融为一体。教材配套华为 ICT 学堂在线视频,置入华为工程现场实际案例,读者既可以学习到前沿知识,又可以掌握相关岗位所需的能力。

我很高兴看到这套教材的出版,希望读者在学习后,能够构建起完备的移动通信知识体系,掌握相关的实用工程技能,成为电子信息领域的优秀应用型人才。

教育部电子信息与电气工程专业认证委员会学术委员会副主任委员
北京交通大学



2017年12月

为了培养适应现代通信技术发展的应用型高级专业人才,保证 LTE 技术优质高效推广应用,促进通信行业的进一步发展,我们在总结多年的 LTE 教学经验和现网实践的基础上,组织专业老师编写了《网络规划与优化技术》一书。本书侧重于现在发展迅速的移动通信领域的 LTE 技术、网络规划与网络优化等方面的知识。

全书分 15 章,第 1~2 章概述了无线传播基础知识;第 3~7 章详细介绍了移动通信发展、LTE 基本原理;第 8~11 章详细介绍了 LTE 无线网络规划以及基站勘测;第 12~15 章详细讲述了 LTE 网络优化常用手段及网络优化问题分析。

本书的内容适合在校通信类专业的学生、运营商的设备维护人员、通信技术类公司等行业的从业人员学习。本书穿插了在线视频二维码,读者可以通过扫描二维码在线观看相关技术视频。完成本书的学习,读者能够掌握 LTE 网络优化工程师需要具备的工作技能。

本书的参考学时为 46~75 学时,建议采用理论实践一体化教学模式,各项目的参考学时见下面的学时分配表。

学时分配表

章节	课程内容	学时
第 1 章	无线传播理论	2~4
第 2 章	天线和馈线基础知识	2~4
第 3 章	移动通信的演进和 LTE 系统概述	4~6
第 4 章	LTE 空中接口物理层	6~8
第 5 章	LTE 信令与协议	6~8
第 6 章	LTE 特性算法	4~6
第 7 章	LTE-A 技术	2~4
第 8 章	LTE 无线网络覆盖估算	2~4
第 9 章	基站勘测	2~4
第 10 章	电磁背景干扰测试	2~3
第 11 章	LTE 小区参数规划	2~4
第 12 章	LTE 单站验证	2~4
第 13 章	LTE RF 优化	4~6
第 14 章	LTE 覆盖问题分析	2~4
第 15 章	LTE 切换问题分析	2~4
	课程考评	2
课时总计		46~75

本书由朱明程、王霄峻担任主编，负责全书的整体构思、大纲设计、通稿和全书审阅。李建蕊、方朝曦、杨德相、张轲任副主编。

由于编者水平和经验有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正，并提供宝贵意见，以使本书再版时提高质量。

编者

2017年11月

第 1 章 无线传播理论 1	
1.1 无线电波传播模型..... 2	
1.1.1 自由空间传播..... 2	
1.1.2 Okumura-Hata 模型..... 2	
1.1.3 COST231-Hata 模型..... 3	
1.1.4 Keenan-Motley 模型..... 3	
1.1.5 “通用”传播模型..... 4	
1.2 抗衰落技术..... 5	
1.2.1 分集技术..... 5	
1.2.2 均衡技术..... 6	
练习题..... 7	
第 2 章 天线和馈线基础知识 8	
2.1 天线的概念..... 9	
2.2 天线的规范和分类..... 9	
2.2.1 辐射指标..... 9	
2.2.2 电气指标..... 15	
2.2.3 机械指标..... 16	
2.3 馈线和跳线..... 17	
练习题..... 18	
第 3 章 移动通信的演进和 LTE 系统概述 19	
3.1 移动网络演进..... 20	
3.1.1 第一代移动通信系统..... 20	
3.1.2 第二代移动通信系统..... 20	
3.1.3 第三代移动通信系统..... 21	
3.1.4 第四代移动通信系统..... 21	
3.2 多址技术..... 22	
3.2.1 频分多址..... 23	
3.2.2 时分多址..... 23	
3.2.3 码分多址..... 23	
3.2.4 正交频分多址..... 24	
3.3 双工..... 24	
3.3.1 频分双工..... 25	
3.3.2 时分双工..... 25	
3.4 频谱划分..... 25	
3.4.1 GSM 频段..... 25	
3.4.2 UMTS 频段..... 26	
3.4.3 LTE 频段..... 26	
3.4.4 载波频率 EARFCN 计算..... 27	
3.4.5 EARFCN 计算实例..... 27	
3.5 信道编码..... 28	
3.5.1 传输块循环冗余校验..... 29	
3.5.2 码块分段及 CRC 添加..... 29	
3.5.3 信道编码..... 30	
3.5.4 速率匹配..... 30	
3.5.5 码块级联..... 31	
3.6 OFDM 原理..... 31	
3.6.1 频分复用..... 32	
3.6.2 OFDM 子载波..... 32	
3.6.3 快速傅里叶变换..... 33	
3.6.4 LTE FFT 点数及载波带宽..... 33	
3.6.5 OFDM 符号映射..... 34	
3.6.6 时域干扰..... 34	
3.6.7 OFDM 优缺点分析..... 35	
3.7 LTE 无线接口协议..... 36	
3.7.1 Uu 口协议栈..... 36	
3.7.2 非接入层..... 37	
3.7.3 RRC 层..... 37	
3.7.4 PDCP 层..... 38	
3.7.5 RLC 层..... 38	
3.7.6 MAC 层..... 39	
3.7.7 物理层..... 39	
练习题..... 40	
第 4 章 LTE 空中接口物理层 41	
4.1 LTE 信道结构..... 42	

4.1.1	逻辑信道	42	4.9.1	重传类型	69
4.1.2	传输信道	43	4.9.2	HARQ 方法	69
4.1.3	物理信道	44	4.9.3	LTE 系统中的 HARQ	71
4.1.4	信道映射	44	4.9.4	下行 HARQ	71
4.2	LTE 的帧结构	45	4.9.5	上行 HARQ	71
4.2.1	TDD 无线帧结构	45	4.9.6	ACK/NACK 发送时序	71
4.2.2	FDD 无线帧结构	46	4.10	多天线技术	73
4.3	下行 OFDMA	46	4.10.1	单用户 MIMO 和多 用户 MIMO	73
4.3.1	OFDMA 结构概述	46	4.10.2	MIMO 和发送方式	73
4.3.2	物理资源的相关概念	47	4.10.3	MIMO 模式	73
4.4	LTE 下行物理信道	48	4.10.4	LTE 系统中的空间复用	75
4.4.1	物理广播信道	48	4.10.5	反馈信息上报	75
4.4.2	物理 HARQ 指示信道	49	练习题		77
4.4.3	物理控制格式指示信道	50	第 5 章 LTE 信令与协议	78	
4.4.4	物理下行控制信道	51	5.1	UE 开机入网流程	79
4.4.5	物理下行共享信道	53	5.1.1	PLMN 选择	79
4.5	LTE 小区搜索流程	54	5.1.2	小区搜索	79
4.5.1	小区搜索	54	5.1.3	系统消息接收	80
4.5.2	PSS 的相关识别	55	5.1.4	小区选择	87
4.5.3	SSS 的相关识别	56	5.1.5	随机接入	87
4.5.4	主信息块	56	5.1.6	Attach 流程	88
4.5.5	系统消息	57	5.2	寻呼流程	102
4.5.6	PLMN 选择	58	5.3	TAU 流程	105
4.5.7	小区选择	59	5.3.1	空闲态 TAU 流程	105
4.6	LTE 上行物理信道	60	5.3.2	RRC 连接态 TAU 流程	108
4.6.1	物理随机接入信道	60	5.4	切换流程	108
4.6.2	物理上行共享信道	60	5.4.1	基站内小区间的切换	108
4.6.3	物理上行控制信道	61	5.4.2	基站间基于 X2 的 切换流程	109
4.7	LTE 参考信号	61	5.5	Detach 流程	113
4.7.1	下行参考信号	61	5.5.1	UE 发起的 Detach 流程	113
4.7.2	上行参考信号	63	5.5.2	MME 发起的 Detach 流程	114
4.8	LTE 随机接入过程	64	练习题		117
4.8.1	RRC 连接	65	第 6 章 LTE 特性算法	118	
4.8.2	PRACH 前导	65	6.1	LTE 空闲态管理	119
4.8.3	随机接入过程的发起	66			
4.8.4	随机接入响应窗	67			
4.8.5	随机接入响应	67			
4.8.6	上行发送	68			
4.9	HARQ 实现	69			

6.1.1	PLMN 选择	119	9.2.2	资料准备	172
6.1.2	小区搜索及选择	120	9.2.3	勘测协调会	172
6.1.3	小区重选	123	9.3	站点详细勘测	173
6.1.4	跟踪区更新	126	9.3.1	站点环境勘测	173
6.1.5	寻呼	127	9.3.2	天面勘测	174
6.2	系统内切换算法	129	9.3.3	勘测记录	175
6.2.1	同频切换	135	9.4	勘测报告输出	176
6.2.2	异频切换	137	练习题		176
6.3	功率控制	143	第 10 章 电磁背景干扰测试	177	
6.3.1	下行功率控制	145	10.1	电磁背景干扰测试概述	178
6.3.2	上行功率控制	147	10.1.1	电磁背景干扰来源	178
练习题		151	10.1.2	电磁背景干扰的 评估标准	178
第 7 章 LTE-A 技术	152		10.1.3	电磁背景干扰测试工具	179
7.1	LTE-A 关键技术	153	10.2	电磁背景干扰测试概述	180
7.1.1	载波聚合	153	10.2.1	测试流程	180
7.1.2	下行 256QAM	155	10.2.2	测试操作步骤	181
7.1.3	异构网络 HetNet	156	10.3	电磁背景测试数据分析	184
7.1.4	多点协作 (CoMP)	156	10.3.1	FDD 系统上行测试 数据分析	184
7.1.5	高阶 MIMO	158	10.3.2	FDD 系统下行测试 数据分析	186
7.1.6	eRelay	159	10.3.3	TDD 系统测试数据分析	187
7.2	LTE-A 成功案例	159	10.4	干扰定位	188
7.2.1	LTE 4×4 MIMO 现场试验	159	10.4.1	FDD 系统上行干扰定位	188
7.2.2	第一个商用 CA 的 LTE 网络	160	10.4.2	FDD 系统下行干扰定位	189
练习题		160	10.4.3	TDD 系统干扰定位	189
第 8 章 LTE 无线网络 覆盖估算	161		练习题		190
8.1	下行链路预算	162	第 11 章 LTE 小区参数规划	191	
8.2	上行链路预算	166	11.1	小区参数规划概述	192
8.3	传播模型	167	11.2	频率规划	192
8.4	基站面积计算	168	11.3	邻区规划	195
8.5	基站数量计算	169	11.3.1	邻区规划原则	196
练习题		169	11.3.2	邻区规划方法	196
第 9 章 基站勘测	170		11.4	PCI 规划	198
9.1	基站勘测流程	171	11.5	PRACH 参数规划	200
9.2	勘测前准备	171	11.5.1	PRACH 格式	200
9.2.1	工具和常用仪器	171	11.5.2	PRACH 根序列规划	201
			11.6	TA 规划	201

11.7 时隙子帧配比规划 (TDD)	204	13.4.3 越区覆盖导致 RRC 连接重建	236
练习题	204	练习题	237
第 12 章 LTE 单站验证.....205		第 14 章 LTE 覆盖问题分析238	
12.1 单站验证流程.....	206	14.1 覆盖问题分类.....	239
12.1.1 单站验证概述.....	206	14.1.1 覆盖空洞	239
12.1.2 单站点验证基本流程	206	14.1.2 弱覆盖	239
12.1.3 单站点验证准备.....	207	14.1.3 越区覆盖	240
12.1.4 测试与分析	209	14.1.4 重叠覆盖	240
12.2 LTE 单站验证项目	209	14.2 覆盖问题分析流程	240
12.2.1 DT 覆盖测试.....	209	14.2.1 基础数据采集.....	240
12.2.2 LTE 接入功能测试.....	210	14.2.2 覆盖指标	241
12.2.3 LTE ping 业务功能测试	212	14.2.3 覆盖优化目标.....	241
12.2.4 LTE FTP 业务功能测试	214	14.2.4 覆盖问题分析流程	242
12.2.5 LTE 站内切换验证测试	217	14.3 常见覆盖及优化方法	243
12.3 单站验证报告及实例.....	218	14.3.1 弱覆盖问题	243
12.3.1 单站验证报告.....	218	14.3.2 越区覆盖问题.....	243
12.3.2 单站验证实例.....	219	14.3.3 重叠覆盖问题.....	244
练习题	220	14.4 优化案例	244
第 13 章 LTE RF 优化221		14.4.1 弱覆盖案例.....	244
13.1 RF 优化概述.....	222	14.4.2 越区覆盖案例.....	245
13.1.1 LTE 网络问题.....	222	14.4.3 重叠覆盖案例.....	246
13.1.2 网络优化阶段.....	222	练习题	248
13.2 RF 优化原理.....	223	第 15 章 LTE 切换问题分析249	
13.2.1 网络质量评估.....	223	15.1 LTE 切换原理.....	250
13.2.2 数据分析与优化.....	223	15.1.1 LTE 切换基本过程	250
13.3 RF 优化流程.....	229	15.1.2 LTE 切换相关事件.....	250
13.3.1 优化目标确定.....	229	15.1.3 LTE 同频切换参数分析	250
13.3.2 Cluster 划分/优化 区域确定	230	15.1.4 LTE 切换信令流程	251
13.3.3 确定测试路线.....	231	15.2 LTE 切换问题分析及定位....	254
13.3.4 测试工具和资料准备	231	15.2.1 切换常见异常场景	254
13.3.5 数据采集	232	15.2.2 切换失败问题定位	256
13.3.6 工参核查	233	15.3 切换案例分析.....	258
13.4 RF 优化案例分析	234	15.3.1 邻区错配导致切换失败.....	258
13.4.1 小区 MOD3 干扰导致 速率低	234	15.3.2 切换过晚导致 UE 未收到 切换命令	260
13.4.2 小区邻区漏配导致速率低... 235		练习题	263
		缩略词	264

第 1 章 无线传播理论

无线电波在基站与终端之间的传播往往经过多条路径。由于经过不同传播路径到达接收机的信号具有不同的幅度和相位，它们的合成效果将导致接收机收到的信号产生衰落。本章主要介绍常见的无线电波传播模型，以及对抗衰落的分集和均衡技术。

课堂学习目标

- 了解常见的无线电波传播模型
- 掌握抗衰落分集技术和均衡技术



1.1 无线电波传播模型

传播模型用于预测无线电波在各种复杂传播路径上的路径损耗，是移动通信网小区规划的基础。传播模型的准确与否，关系到小区规划是否合理，运营商是否以比较经济合理的投资满足了用户的需求。模型的价值就是保证了精度，同时节省了人力、费用和时间。

1.1.1 自由空间传播

在研究电波传播时，首先要研究两个天线在自由空间（各向同性，无吸收，电导率为零的均匀介质）条件下的特性，即自由空间的传播损耗。

自由空间传播损耗（dB）公式：

$$L_p = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg d \quad (1-1)$$

式中， f 的单位为 MHz， d 的单位是 km， L_p 的单位为 dB。

从式（1-1）中可以推导出以下结论：

- （1）当距离 d 加倍时，自由空间传播损耗增加 6 dB，即信号衰减为 1/4。
- （2）当频率 f 加倍时，自由空间传播损耗增加 6 dB，即信号衰减为 1/4。

有了自由空间的传播损耗公式后，考虑传播环境对无线传播模型的影响，确定某一特定地区的传播环境的主要因素如下。

- （1）自然地形（高山、丘陵、平原、水域等）。
- （2）人工建筑的数量、高度、分布和材料特性。
- （3）在做网络规划时，一个城市通常会被划分为密集城区、一般城区、郊区、农村等几类不同的区域，以保证预测的精度。
- （4）该地区的植被特征为植物覆盖率，不同季节的植被情况是否有较大的变化。
- （5）天气状况，是否经常下雨、下雪。
- （6）自然和人为的电磁噪声状况，周边是否有大型的干扰源（雷达等）。
- （7）系统工作频率和终端运动状况，在同一地区，工作频率不同，接收信号衰落状况各异，静止的终端与高速运动的终端的传播环境也大不相同。

常用传播模型如表 1-1 所示。

表 1-1 常用传播模型

模型名称	适用范围
Okumura-Hata	适用于 150 ~ 1 000 MHz 宏蜂窝预测
COST231-Hata	适用于 1500 ~ 2 000 MHz 宏蜂窝预测
Keenan-Motley	适用于 900 MHz 和 1 800 MHz 室内环境预测

1.1.2 Okumura-Hata 模型

Okumura-Hata 模型在 900MHz 的 GSM 中得到了广泛应用，适用于宏蜂窝的路径损耗预测。Okumura-Hata 模型是根据测试数据统计分析得出的经验公式，应用在 150 ~ 1 000 MHz 之间，适用于小区半径为 1 ~ 20 km 的宏蜂窝系统，其基站天线高度在 30 ~ 200 m 之间，终端有效天线高度在 0 ~ 1.5 m 之间。

Okumura-Hata 传播模型公式为：

$$L_p = 69.55 + 26.16 \lg f - 13.82 \lg h_b + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d - A_{hm} \quad (1-2)$$

式(1-2)中:

- ① f 为频率。
- ② h_b 为基站天线有效高度。
- ③ d 为发射天线和接收天线之间的水平距离。
- ④ $A_{hm} = (1.1 \times \lg f - 0.7)h_m - (1.56 \lg f - 0.8)$ 。

当模型应用于郊区和开阔地区时,为了使预测结果更准确,需要对计算结果进行修正。

(1) 对于郊区,结果修正为式(1-3):

$$L_{b(\text{suburb})} = L_p - 2 \times \left[\lg\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5.4 \quad (1-3)$$

(2) 对于开阔地区,结果修正为式(1-4):

$$L_{p(\text{open})} = L_p - 4.78 \times [\lg(f)]^2 + 18.33 \times \lg(f) - 40.94 \quad (1-4)$$

1.1.3 COST231-Hata 模型

COST231-Hata模型是EURO-COST组成的COST工作委员会开发的Hata模型的扩展版本,应用频率在1500~2000 MHz之间,适用于小区半径为1~20 km的宏蜂窝系统,发射有效天线高度在30~200 m之间,接收有效天线高度在1~10 m之间。

COST231-Hata传播模型公式为:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \lg f - 13.82 \lg h_b + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d - A_{hm} + C_m \quad (1-5)$$

式(1-5)中,

- ① f 为频率。
- ② h_b 为基站天线有效高度。
- ③ d 为发射天线和接收天线之间的水平距离。
- ④ $A_{hm} = (1.1 \times \lg f - 0.7)h_m - (1.56 \lg f - 0.8)$

C_m 为大城市中心校正因子,大城市 $C_m = 3$ dB,中等城市和郊区中心区 $C_m = 0$ dB。

当模型应用于农村地区时,为了使预测结果更准确,需要对计算结果进行修正。

(1) 对于农村(准开阔地),结果修正为式(1-6):

$$L_{p(\text{quasi-open})} = L_p - 4.78 \times [\lg(f)]^2 + 18.33 \times \lg(f) - 35.94 \quad (1-6)$$

(2) 对于开阔地,结果修正为式(1-7):

$$L_{p(\text{open})} = L_p - 4.78 \times [\lg(f)]^2 + 18.33 \times \lg(f) - 40.94 \quad (1-7)$$

1.1.4 Keenan-Motley 模型

Keenan-Motley模型应用于室内环境,主要的传播模型根据是否视距传播分为以下两种。

(1) 视距传播模型(LOS)为式(1-8):

$$L_p = 20 \lg d + 20 \lg f - 28 + X_\sigma \quad (1-8)$$

(2) 非视距传播模型(NLOS)为式(1-9):

$$L_p = 20 \lg d + 20 \lg f - 28 + L_{f(n)} X_\sigma \quad (1-9)$$

其中, X_σ 为慢衰落余量,取值与覆盖概率和室内慢衰落标准差有关; $L_{f(n)} = \sum_{i=0}^n P_i$,式中, P_i 表示第 i 面隔墙的穿透损耗; n 表示隔墙数量。

隔墙穿透损耗典型值如表1-2所示。

表 1-2 隔墙穿透损耗典型值

频率 (GHz)	混凝土墙 (dB)	砖墙 (dB)	木板 (dB)	厚玻璃墙 (玻璃幕墙) (dB)	薄玻璃 (普通玻璃窗) (dB)	电梯门综合穿透损耗 (dB)
1.8~2	15~30	10	5	3~5	1~3	20~30

1.1.5 “通用”传播模型

在实际使用过程中,还需要考虑到现实环境中各种地物地貌对电波传播的影响,从而更好地保证了覆盖预测结果的准确性。因此,在各种规划软件里,一般都使用“通用”的传播模型,然后根据各个地区的不同情况,对模型参数校正后再使用。

传播模型公式:

$$L_p = K_1 + K_2 \lg(d) + K_3 \lg(H_{T_{\text{eff}}}) + K_4 \times \text{Diffractionloss} + K_5 \lg(d) \times \lg(H_{T_{\text{eff}}}) + K_6 (H_{R_{\text{eff}}}) + K_{\text{clutter}} f(\text{clutter}) \quad (1-10)$$

式(1-10)中:

- ① K_1 为与频率相关的常数。
- ② K_2 为距离衰减常数。
- ③ d 为发射天线和接收天线之间的水平距离。
- ④ K_3 为基站天线高度修正系数。
- ⑤ $H_{T_{\text{eff}}}$ 为发射天线的有效高度。
- ⑥ K_4 为绕射损耗的修正因子。
- ⑦ Diffractionloss 为传播路径上障碍物绕射损耗。
- ⑧ K_5 为基站天线高度与距离修正系数。
- ⑨ K_6 为终端天线高度修正系数。
- ⑩ $H_{R_{\text{eff}}}$ 表示接收天线的有效高度。
- ⑪ K_{clutter} 为地物 clutter 的修正因子。
- ⑫ $f(\text{clutter})$ 为地貌加权平均损耗。



无线电波传播模型

不同地物及地貌情况下的参考修正值如表 1-3 所示。

表 1-3 不同地物及地貌情况下的参考修正值

clutter	Offset(dB)	clutter	Offset(dB)
内陆水域	-1	高层建筑	18
海域	-1	普通建筑	2
湿地	-1	大型低矮建筑	-0.5
乡村	-0.9	成片低矮建筑	-0.5
乡村开阔地带	-1	其他低矮建筑	-0.5
森林	15	密集新城区	7
郊区城镇	-0.5	密集老城区	7
铁路	0	城区公园	0
		城区办开阔地带	0

1.2 抗衰落技术

无线信道是随机时变信道，信号在无线信道中传播，会产生传播损耗（路径损耗）、慢衰落（阴影衰落）和快衰落。信号衰落示意图如图 1-1 所示。

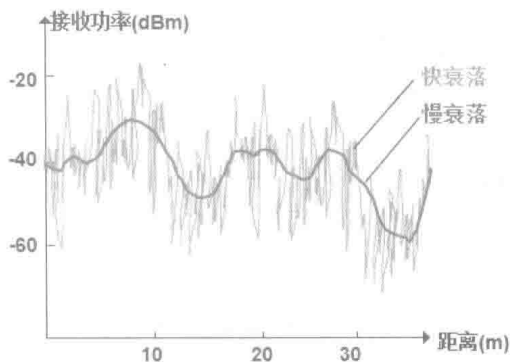


图 1-1 信号衰落示意图

传播损耗是指在空间传播所产生的损耗，它描述了由于移动用户与基站之间相对距离产生变化而引起的损耗的变化，主要与无线电波频率以及移动用户与基站之间的距离有关。

慢衰落损耗是由于在电波传播路径上受到建筑物及山丘等的阻挡所产生的阴影效应而产生的损耗。它反映了中等范围内数百波长量级接收电平的均值变化而产生的损耗，一般遵从对数正态分布。

快衰落损耗是由于多径传播而产生的损耗，它反映微观小范围内数十波长量级接收电平的均值变化而产生的损耗，一般遵从瑞利分布或莱斯分布。快衰落又可以细分为以下 3 类。

(1) 空间选择性衰落：不同的地点，不同的传输路径衰落特性不一样。

(2) 时间选择性衰落：用户的快速移动在频域上产生多普勒效应而引起频率扩散，从而引起时间选择性衰落。

(3) 频率选择性衰落：不同的频率衰落特性不一样，引起时延扩散，从而引起频率选择性衰落。

衰落会降低通信系统的性能，为了对抗衰落，可以采用多种措施，常用方法有分集技术和均衡技术。

1.2.1 分集技术

分集就是利用两条或多条传输途径传输相同信息，并对接收机输出信号进行选择或合成，来减轻衰落影响的一种措施。常用的分集技术可分为空间分集、极化分集、时间分集和频率分集。

1. 空间分集

空间分集采用主分集天线接收的办法来解决快衰落问题。基站的接收机对主分集通道分别接收到的信号进行处理（一般采取最大似然法），接收的效果由主分集天线接收的不相关性所保证。所谓不相关性，是指主集天线接收到的信号与分集天线接收到的信号不具有同时衰减的特性，这也就要求采用空间分集时主分集天线之间的水平间距大于 10 倍的无线信号波长，如图 1-2 所示，分集距离 D 的合理范围为 $10 \sim 20$ 波长。或者采用极化分集的办法，保证主分集天线接收到的信号不具有相同的衰减特性。

2. 极化分集

极化分集采用双极化天线，一根天线内有两个极化方向，衰落特性互不相关的两路多径 A 和 B 最终被

合并成一路信号。极化分集与空间分集相比,可以节省安装空间。极化分集天线如图 1-3 所示。V+H 表示垂直和水平两路信号, \ / 表示 +45° 和 -45° 两路信号。

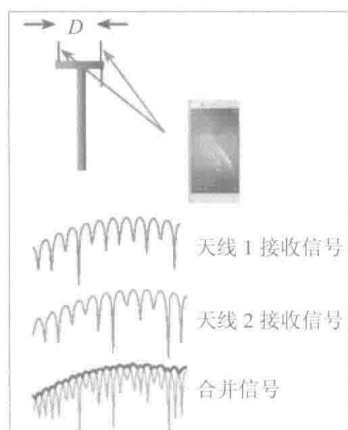


图 1-2 分集距离 D 的合理范围为 10~20 波长

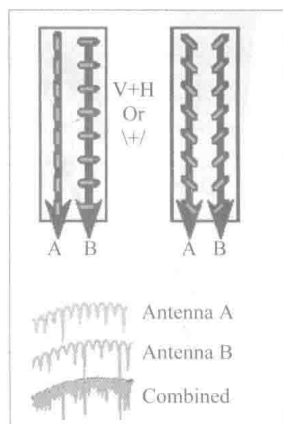


图 1-3 极化分集天线

3. 时间分集

时间分集采用符号交织、检错和纠错编码等方法。不同编码所具备的抗衰落特性不一样,编码也是当今移动通信广泛使用的技术。交织技术如图 1-4 所示。

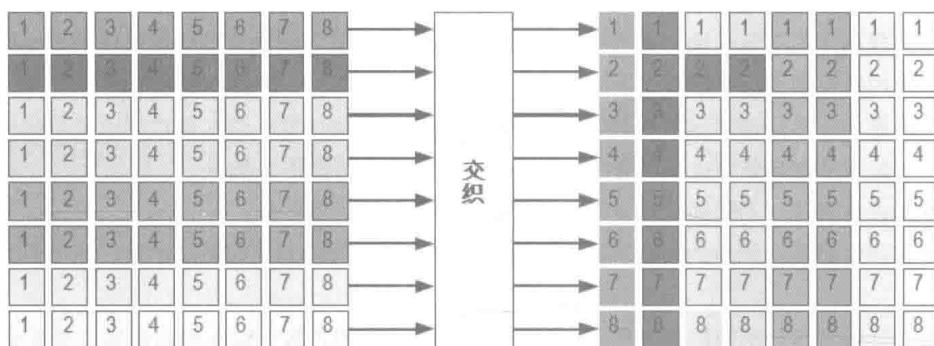


图 1-4 交织技术

4. 频率分集

频率分集采取扩频方式来解决快衰落。频率分集理论的基础是相关带宽,即当两个频率相隔一定间隔后,就认为它们的空间衰落特性是不相关的。当两个频率间隔大于 200 kHz,移动通信频段就可获得这种不相关性。在 GSM 移动通信中,采用跳频这种扩频方式来获得分集增益。在 CDMA 移动通信中,由于每个信道都工作在较宽频段,本身就是一种扩频通信。

1.2.2 均衡技术

数字通信系统中,由于多径传输、信道衰落等影响,接收端会产生严重的码间干扰(Inter Symbol Interference, ISI),增大误码率。为了克服 ISI,提高通信系统的性能,在接收端需采用均衡技术。均衡是指对信道特性的均衡,即接收端的均衡器产生与信道特性相反的特性,用来减小或消除因信道的时变多径传播特性引起的码间干扰。

均衡有两种基本实现途径。一为频域均衡,它使包括均衡器在内的整个系统的总传输函数满足无失真