

移动通信前沿技术丛书

第三代移动通信 中的无线资源管理

沈 洁 申志坚 李 敏 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

沈洁 1997年毕业于上海交通大学，获学士学位；2000年获北京邮电大学硕士学位。长期从事第三代移动通信系统（W-CDMA和TD-SCDMA）的研究开发工作，对无线资源管理（RRM）算法和信号处理算法有深入的研究。

申志坚 2002年毕业于北京邮电大学，获理学硕士学位。从事W-CDMA系统无线资源管理、信号处理、多业务模型、网络规划等方面的科研工作。有多篇论文发表。

李楠 2000年毕业于中南理工大学通信系，获学士学位；2003年毕业于信息产业部电信研究院，获硕士学位。从事第三代移动通信系统（TD-SCDMA）的无线资源管理（RRM）算法的研究工作。有多篇论文发表和多项发明专利。

ISBN 7-121-01408-4



9 787121 014086 >



责任编辑：许楷

责任美编：陈晓磊

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 7-121-01408-4 定价：25.00元

移动通信前沿技术丛书

第三代移动通信中的 无线资源管理

沈洁 申志坚 李楠 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统讲述了第三代移动通信系统 UMTS 在 FDD 和 TDD 两种制式下的无线资源管理算法以及与 QoS 相关的多业务定量分析的研究。

本书共分三部分。第一部分(第 1~4 章)是对 CDMA 及无线资源管理背景知识的介绍;第二部分(第 5~12 章)对无线资源管理相关算法的理论和实现做了详细介绍;第三部分(第 13~15 章)是对与资源管理相关的多业务模型、QoS 参数以及经济因素的考虑。

本书可以作为高等院校电子通信专业高年级本科生、研究生的参考书,也可供移动通信行业运营商、设备制造商及工程技术人员在进行系统研究和设计时参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

第三代移动通信中的无线资源管理/沈洁等编著. —北京:电子工业出版社, 2005.8

(移动通信前沿技术丛书)

ISBN 7-121-01408-4

I. 第… II. 沈… III. 移动通信—通信系统—系统管理 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 059941 号

责任编辑:许 楷

印 刷:北京燕南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:397 千字

印 次:2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:25.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

随着无线通信的迅速发展和技术的不断进步,人们越来越多地享受到无线通信带来的便捷,然而无线资源(例如,频带、终端的功率等)却日见稀缺。无线系统是资源受限的系统,从第一代的模拟系统到第二代的 GSM,以及目前正在研发的第三代 CDMA 移动通信系统。为此,一方面,工程技术人员扩展可用的资源,如增加硬件对数字信号的处理能力,更为精确地测定并限制各种损耗和干扰,采用时分、频分、码分、空分的方式将无线资源扩展到四维空间;另一方面,如何最优地使用已有的无线资源也是工程师们面临的主要难题。为此,在本书中就第三代移动通信系统的无线资源管理(RRM)的模型及算法问题进行了详尽的阐述。目前第三代无线移动通信系统主要有三个国际标准:北美的 CDMA 2000、欧洲及日本的 W-CDMA、我国的 TD-SCDMA。我们主要选取 W-CDMA 系统的 RRM 进行介绍,另外兼顾介绍 TDD 模式的动态信道分配算法。3GPP 标准中的 TS25.922 仅给出 RRM 的建议算法,而具体算法的实现则是非常灵活的。我们认为,RRM 算法是一个有机的整体,各组成部分相互关联,可以用一个有限状态机的模型加以表示。而具体的有关 RRM 系统结构的看法则是仁者见仁,智者见智。同时 RRM 也是一个动态发展的研究方向,例如,针对 3GPP 中的全 IP 的建议,RRM 更多地会关注数据业务相关资源的调度。随着新的研究方法的引入,比如采用神经网络模型,可以预见 RRM 算法将趋向于智能化、自适应的调节方式,并将与网络规划中的实际地理信息相结合。有兴趣的读者可以进一步研究著名国际专业期刊 IEEE 上关于这方面的文章。

本书分为三部分。第一部分(第 1~4 章)是背景知识的介绍,包括 RRM 的历史、所用的数学分析模型,以及进行仿真分析的方法。第二部分(第 5~12 章)对各种 RRM 算法做了详尽的介绍,包括与系统性能密切相关的功率控制、切换、动态信道分配、系统容量分析、包调度、接纳控制、拥塞控制、码分配、传输格式选择等。第三部分(第 13~15 章)主要介绍与 RRM 相关的系统因素,如 QoS 要求,这里我们讨论了 W-CDMA 中多业务模型对 RRM 的影响,以及 RRM 涉及的系统小区规划和经济方面的因素。

对于 RRM 的仿真,涉及到物理层的链路仿真以及网络规划的输出参数,同时 RRM 也为网络规划提供参数。在当前的高端仿真工具中以美国的 Opnet 最为有名,而对于一般研究者可以采用 MATLAB 进行 RRM 仿真。

本书所面向的读者对象为从事无线通信领域研究的科技人员,以及相关专业的学生。特别对于从事 3G 系统研发的工程师有很高的参考价值。

在此,感谢在科研工作中老师和同事们的帮助,使我们有机会对 RRM 算法进行一定的研究。同时,本书的内容主要来自论文资料,不代表任何企业的观点,书中所列算法、参数也仅供参考,如果在工程系统设计过程中要采用这些算法,希望能够结合系统特点进行仿真实验。

最后,感谢电子工业出版社的竺南直老师、沈艳波编辑,是他们的劳动使本书得以面世。

编著者

2004 年 10 月

目 录

第 1 章 无线资源管理简介	(1)
1.1 无线资源管理回顾	(1)
1.2 无线网络中的关键问题	(3)
参考文献	(4)
第 2 章 干扰信道中的链路特性	(5)
2.1 多用户接入无线通信系统	(5)
2.1.1 问题引述	(5)
2.1.2 多用户系统信号设计	(6)
2.1.3 基本正交复用模式	(12)
2.1.4 扩频及非正交复用	(15)
2.2 链路特征模型	(23)
第 3 章 无线网络模型	(26)
3.1 资源管理问题	(26)
3.2 服务质量模型和用户行为问题	(30)
第 4 章 蜂窝系统原理	(34)
4.1 频率复用	(34)
4.2 静态信道分配和简单容量分析	(37)
4.3 基于话务量的容量分析	(40)
4.4 基于中断的容量分析	(44)
4.4.1 干扰中断	(44)
4.4.2 解析方法	(45)
4.4.3 仿真方法	(49)
4.5 定向天线和分扇区	(55)
第 5 章 切换及移动性管理	(60)
5.1 移动性管理基础	(60)
5.2 切换决策算法	(62)
5.3 切换资源管理	(68)
5.4 第三代无线移动通信系统中的切换控制	(72)
5.4.1 W-CDMA 的切换控制	(72)
5.4.2 TD-SCDMA 的切换控制	(73)
参考文献	(75)
第 6 章 传输功率控制	(76)
6.1 简介	(76)
6.2 SIR 均衡	(79)
6.3 分布式功率控制	(82)
6.3.1 迭代方法	(82)

6.3.2 迭代方法的收敛	(83)
6.3.3 迭代方法的收敛速度	(83)
6.3.4 标准干扰方程	(85)
6.3.5 受约束的功率控制	(86)
6.3.6 分布式 SIR 均衡	(87)
6.4 移走发射机	(87)
6.5 功率控制的动态行为	(88)
6.6 多速率功率控制	(89)
6.7 第三代移动通信系统中的功率控制	(92)
6.7.1 W-CDMA 的功率控制	(92)
6.7.2 TD-SCDMA 的功率控制	(95)
参考文献	(98)
第 7 章 动态信道分配	(99)
7.1 简介	(99)
7.2 话务量适配的信道分配	(101)
7.3 重用分区	(104)
7.4 基于干扰的 DCA 机制	(108)
7.5 TD-SCDMA 系统中的信道分配	(109)
7.5.1 慢速动态信道分配	(109)
7.5.2 快速动态信道分配	(110)
参考文献	(112)
第 8 章 DS-CDMA 无线网络的容量管理	(113)
8.1 DS-CDMA 随机资源分配	(113)
8.2 DS-CDMA 系统的简单容量估计	(114)
8.3 DS-CDMA 系统的精确容量估计	(116)
8.4 DS-CDMA 系统的厄兰容量	(116)
8.5 多业务 DS-CDMA 系统的容量	(118)
8.6 DS-CDMA 系统的功率控制	(121)
8.7 DS-CDMA 系统的软切换	(123)
8.8 DS-CDMA 系统的动态小区管理	(126)
第 9 章 分组接入系统的资源管理	(129)
9.1 数据流量及性能模型	(129)
9.2 数据包多址接入	(131)
9.3 某些数据包接入应用	(144)
9.3.1 W-CDMA 的包接入	(144)
9.3.2 IEEE 802.11 无线本地网 (WLAN) 接入	(145)
9.3.3 CDMA 2000 的分组调度算法	(145)
参考文献	(150)
第 10 章 接入控制与负荷拥塞控制	(151)
10.1 引言	(151)

10.2	呼叫接入的应用场景	(151)
10.2.1	在 SRNC 处完成 CAC	(151)
10.2.2	在 DRNC 处完成呼叫接入控制	(152)
10.3	CAC 中的 QoS 信息	(153)
10.4	算法及其性能描述	(154)
10.4.1	接入控制算法分类	(154)
10.4.2	PCAC 算法	(155)
10.4.3	算法的描述	(156)
10.4.4	接入控制策略	(157)
10.5	呼叫接入算法流程举例	(157)
10.5.1	上行方向	(158)
10.5.2	下行方向	(162)
10.5.3	算法实现伪代码	(164)
10.6	拥塞负荷控制	(169)
10.6.1	算法原理	(169)
10.6.2	拥塞控制算法伪代码	(170)
	参考文献	(174)
第 11 章	码分配与传输格式选择	(175)
11.1	码分配的原理	(175)
11.1.1	扩频码的产生	(175)
11.1.2	扩频码特性	(176)
11.1.3	码的正交性	(176)
11.1.4	码的分配	(176)
11.2	OVSF 码分配算法	(178)
11.3	码分配算法的结论	(180)
11.4	传输格式选择原理	(181)
11.4.1	上行链路	(182)
11.4.2	下行链路	(184)
11.5	传输格式选择算法流程	(185)
11.5.1	SCr 算法	(185)
11.5.2	TO 算法	(186)
11.5.3	MR 算法	(187)
11.5.4	ThMS 算法	(188)
	参考文献	(190)
第 12 章	基于多业务模型的 QoS 管理	(191)
12.1	引言	(191)
12.2	第三代移动通信系统简介	(191)
12.2.1	IMT-2000 的总体结构及主要特征	(192)
12.2.2	第三代主流通信系统对比分析	(192)
12.3	所涉及的研究方法及基本概念	(193)

12.3.1 业务流量模型的基本概念	(193)
12.3.2 自相似的统计分析方法	(193)
12.3.3 通信网仿真的系统软件介绍	(196)
12.3.4 离散事件仿真的建模方法	(199)
参考文献	(199)
第 13 章 基于分组的第三代通信系统数据业务模型	(201)
13.1 引言	(201)
13.2 数据业务种类的划分方法	(201)
13.3 典型数据业务的主要特性及其模型	(202)
13.3.1 引论	(202)
13.3.2 交互类业务	(204)
13.3.3 后台类业务	(208)
13.4 无线分组业务建模的方法	(211)
13.4.1 基于实际测量的方法	(211)
13.4.2 基于理论分析的方法	(211)
13.4.3 基于仿真分析的方法	(212)
13.5 总结	(212)
参考文献	(213)
第 14 章 小区规划	(214)
14.1 蜂窝的概念	(214)
14.2 基于正六边形几何形状的小区规划	(214)
14.3 层次化小区结构	(216)
14.3.1 在 HCS 中的信道分割	(216)
14.3.2 基于速率的层次间切换	(218)
14.4 自动小区规划	(218)
参考文献	(218)
第 15 章 无线基础设施的基本经济因素	(219)
15.1 电信基础设施	(219)
15.2 无线接入系统	(221)
15.3 宽带无线基础网的费用模型	(223)
15.4 第三代移动通信系统的频谱管理	(228)
15.4.1 3G 频谱的规划方案	(228)
15.4.2 TD-SCDMA 系统在频谱利用率方面的优势	(228)
参考文献	(229)
附录 A 无线网络的传播模型	(230)
附录 B 仿真模型	(233)

第 1 章 无线资源管理简介

1.1 无线资源管理回顾

无线通信的发明已经有一百多年的历史了。然而从工程技术的角度看，在开发过程的每个阶段，都会在一些关键技术处理上陷入瓶颈。对于关键问题的解决推动了技术的进步，但同时新问题又会随之而来。在这里，我们简单回顾一下在无线通信发展历史中遇到的一些关键问题。

关键问题 1：路径损耗

在 20 世纪早期广泛采用的无线电报接收机，实际上是一种被动装置，主要由简单调制电路组成，比如将带通滤波器调制到发射机的频带上，这时接收机的能量全部来源于发射机。无线连接中的能量损失，即路径损耗是非常大的，尤其在远距离传播时更为严重。早期主流的无线发射机非常庞大，可以发射巨大的能量。这种装置除了在大型船舶上使用以外，应用十分有限。随着电子管放大器的发明使上述问题得以解决。通过在接收机中安装电子管放大器，可以补偿路径损耗。20 世纪 20 年代产生了无线广播。30 年代产生了电视。到了五六十年代，晶体管取代了电子管，同时有了可以随身携带的收音机。然而对于工程师们来说，他们又遇到了另一个瓶颈——热噪声。

关键问题 2：热噪声

在各种电子材料和电子仪器中，由于布朗运动产生的各种特性以及无法消除的热噪声，对人们提出了新的挑战。因为，当人们放大接收信号功率的时候，噪声也随之被放大了。第二个关键问题的解决是在 20 世纪 40 年代，人们认识到，信息量是非常有限的，而接收机的性能取决于抑制噪声的多少。

仙农于 1949 年发表了论文“通信中的数学理论”，为此问题的解决提供了方向，并预示着数字通信时代的到来。尽管当时在实现上有一定的困难，但随着 20 世纪七八十年代产生的大规模集成电路（LSI）和数字信号处理器（DSP）使问题得以解决。今天的无线通信装置的性能基本能够接近仙农的理论界限。卫星通信及空间探索为数字移动电话的产生提供了解决思路。如今的移动电话可以在各种环境下维持一定的话音质量，例如，在移动的车辆中或是在室内。

随着新技术的采用，工程师们可以设计出达到物理定律给出的噪声受限系统的理论边界。20 世纪 30 年代，工程师们遇到的另一个难题是无线频率资源的限制。

关键问题 3：频谱限制

尽管仙农在其带宽受限信道的分析中已提及这个问题，但它并非是一个单纯的技术问题。各种自然资源总是有限的，多个用户之间的相互干扰不可避免地会引起冲突。例如，有

人在晚上要收听中波（AM）波段的广播，而数百个广播电台又会相互竞争以吸引听众，这样相互干扰的后果将是灾难性的。如果广播电台之间相互独立，接收的信号是清晰的，它们之间又会相互竞争占用频带。这在早期已引起无线行业的注意，并已经成立机构来处理共享频谱资源的划分。

二战后成立的国际电信联盟（ITU）就是为了解决这个问题而成立的组织。其中为解决频谱资源共享问题而产生的一个想法是：通信中的频率复用。对于早期的调制方式而言，由于产生的都是窄带信号，将用户分配到不同的频带上，可避免相互间的干扰，这是个不错的解决方案。在 ITU 框架内，世界各国就频谱划分形成了一定的规范。在 ITU 的层次上，将 10kHz 到 200 GHz 的频谱分为 100 个频带，即所谓的“无线规范”，其中为频段定义了相应的业务。需要使用无线频谱的业务包括：固定、移动、广播、雷达、业余无线电，等等。需要注意的是，在这个层次上，频谱并不是为特定的国家或个人分配的，而通常是由 ITU 成员国的频率管理委员会分配。频率通常是以发放牌照的方式分配给特定用户的。牌照根据无线设备的技术经济使用周期，有一定的期限限制。频率管理会通过制定政策保证无线规范的实施。对于需要开展远程低频传输业务的发射站的新申请者，需要国际间的协调。也就是说，对于新的申请者，管理会要征求其他使用国的同意，以将影响控制在一定的范围内。与飞速发展的技术相对应的是监管过程缓慢进行的尴尬。

分配频段给新技术，以及对于无线规则的任何更改，都将是非常大的行动，因为这需要得到 ITU 170 个会员国的一致同意。而在国际无线监管会议上由此产生的争论并未停止，原因之一是成员国之间的经济、技术差异太大。一方面，一些国家要求有更高性能的新设备；另一方面，一些国家要保护已投资的设备和终端（认为现有技术已能满足需求）。一些大的变更，可能需要数十年的规划，才可能最终达成一致。

20 世纪 80 年代以后，随着无线通信的市场化和自动化趋势，频率管理会不可能为保证某个特定用户的通话质量而为其单独分配频带。从而采用了另一种方法，即为运营商和无线系统设备的所有者分配频带并发放牌照。在设计系统过程中，运营商会规划频谱的使用，以将其系统中用户之间的干扰控制在一定范围内。通过对无线系统的仔细规划和自动计划，使得对于频谱的利用能够满足当前用户的需要。在规划阶段，每个基站需要预分配频率，并认真规划其站点位置。在系统运行中，终端接入哪个基站，占用哪个频率的信道，都是由系统自动设定的。

第二代的 GSM 系统相对于第一代的模拟通信系统，由于采用了先进的数字信号处理技术，增强了抗干扰能力，可以在不损害话音质量的情况下，容纳更多的用户。

随着新的系统和技术逐步取代第二代无线系统，使设计规则有了明显的改变。不同于第二代的纯语音业务，第三代移动通信系统要更多地处理数据业务以及各种各样的多媒体业务。无线 Internet 业务是第三代系统的典型特征。

对于 2.5 代的 GPRS 系统，已经能够提供 IP 业务。对于第三代的 UMTS 系统，其频谱效率更高，可提供电路交换、数据交换的业务，空中数据传输速率范围为 384 kb/s（大区覆盖）到 2 Mb/s（室内或微蜂窝环境）。此外对于 WLAN 而言，可以提供同样的业务，但需要更高的数据传输速率，如 HIPERLAN II 系统，可在室内提供 10 Mb/s 的速率；对于 B3G 或 4G 而言，数据速率将达到 100 Mb/s。相对于众多的宽带多媒体业务来说，有限的频谱资源使得无线资源的管理会成为非常重要的课题。资源管理（不仅是频谱资源）将呈现出新的特征。此外，还有些重要资源，如通信设备电源管理、系统建设、成本等因素，但它们不在本书讨论之列。

1.2 无线网络中的关键问题

在众多现代通信系统中，一个主要目标是要在固网中接纳大量的移动和静止用户。这种通信系统的用户分布在广大区域，其数量和位置不是事先知道的，该系统被称为区域通信系统或无线网络。一个普通的例子是每天大家使用的广播和电视系统。该系统是通过单向无线连接，将来自多个发送站的节目通过传输网络传送到单个移动的或静止的用户。另一个系统，即我们以后将用很大篇幅讨论的无线蜂窝电话系统，该系统为用户提供服务的固定网是公众电话交换网（PSTN）。固定网通过延伸的基站建立与用户的连接，为用户提供服务。基站为无线终端提供物理上的双向连接。图 1.1 说明了无线网络的设计原理。这个网络包括固网部分和无线接入部分。固网部分提供了基站到无线接入端口（RAP）的连接，RAP 同时也提供到终端的无线连接。RAP 存在于为终端用户提供服务的地理区域中。这种区域被称为服务区，也许对于一些位于城市密集区或室内的系统，讨论业务量会更有意义。请求服务的手机应该位于服务区中，并且指定了对某些 RAP 的连接。这种指定由系统完成且对于用户而言是透明的。对于 RAP 周围的区域，如果手机和 RAP 连接的传输质量满足要求，则这个区域为 RAP 覆盖区。传输质量以及区域的形状，正如我们所看到的，主要依赖于传播条件以及来自于其他用户的干扰。

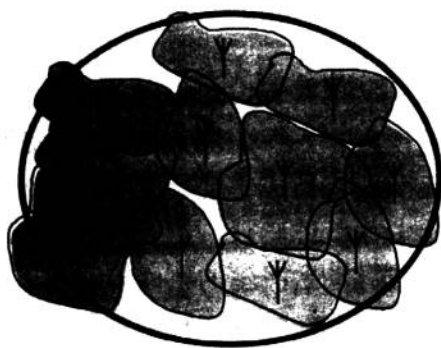


图 1.1 无线通信系统的覆盖示意图

覆盖区的形状通常是不规则的，其中可能有未覆盖区域（盲区），有时也会有重叠区域。在重叠区，终端可以与多个 RAP 进行通信。但是在相反情况下，用户处于盲区，终端不能进行通信，也不能接收信息。服务区中能够满足一定业务质量的部分被称为覆盖区，或系统有效区。量化的定义为在服务区中随机选取均匀分布的接入点能够进行通信的概率。更有趣的是用户有效率，即随机选取的用户能够获得所需通信服务的概率。它的量值是覆盖区的权重除以用户密度，我们将在随后部分中加以讨论。

在像移动电话系统这样的双向通信系统中，需要建立从 RAP 到终端的链路（下行或正向链路），以及从终端到 RAP 的链路（上行或反向链路）。乍一看，两条链路似乎有很多相似特性，但对于移动环境下它们是截然不同的。其传播条件也是完全不同，在蜂窝系统的大区环境中，RAP（基站）的天线通常置于无障碍物遮挡的高处。而终端则相反，通常位于建筑物中或有障碍的地方，由此会产生阴影或多径反射。同样，上下行的干扰情况也是不一样的，因为终端数量较多，位置会经常变化，而 RAP 数量少且位置固定。

考虑到经济因素，我们希望用尽量少的 RAP 覆盖尽可能大的区域。显而易见，这样不但

降低了 RAP 的硬件及安装成本,也减少了与基础网络之间的连线。覆盖范围受各种传播条件的影响,从而设置了所需 RAP 数量的下限值。如果 RAP 之间的距离过大,一个明显的后果是信号质量将大大降低。阴影和多径效应将使情况更加恶化。反之,人们可能会认为相对于 RAP 间的距离而言, RAP 的覆盖太小。我们称这样的系统为范围受限系统。例如,在建网初期,为了尽快覆盖服务区,提供可靠的信号质量,降低成本,在用户数量很少的情况下,就大量安装了 RAP,形成了范围受限系统。另一个例子是早期的广播系统,相对于可获取的带宽而言,发射台的数量较少,而现代成熟的通信系统,如蜂窝或广播系统,发射台数量众多,带宽资源有限。我们称这样的系统为带宽或干扰受限系统。

对于带宽或干扰受限的系统,关键是要解决如何管理稀缺的资源,如带宽,以期满足移动服务提供者(运营商)和享受服务的用户的需求。前者希望获得高效的应用系统,因为这样可以通过为更多的用户提供服务来增加收益。反之,用户则希望被提供良好的服务质量(QoS)。在移动电话系统中,用户的要求可以定义为呼损率的概率形式,即试图建立的连接被阻塞或拒绝的概率。对于数据信息服务,采用应答时间或消息时延来定义 QoS 参数,也许更为恰当。随后我们会见到这个有趣的现象,对于资源管理问题而言,运营商和用户的需求是对立的。运营商希望在有限的系统容量中接纳更多的用户,用户则希望获得更高的服务质量。大量用户涌入系统,不可避免地增大了相互间的干扰,造成传输质量的下降以及长时间的等待。在竞争环境下,如何权衡利弊,对于为客户提供服务的运营商来说,是一个需要仔细斟酌的问题。有效的频率资源管理,如通过规划既可降低 RAP 间干扰,又可减少用户间的干扰,增加系统容量,从而也满足了用户需要的服务质量。

尽管我们将用较大的篇幅讨论频率资源管理问题,但对运营商和用户来说,对其他稀缺资源的管理,也要引起足够的重视。举一个基础网络中这种资源的例子,如交换机、路由器、接入端口等,很明显,设备越密集,当然成本就会更高,系统容量也就越大,为用户提供的 QoS 也就越好。另一个重要资源是系统的功耗,由于现代通信设备都设计得比较小巧,对电源功率有严格限制。此外,考虑到移动台产生的电磁辐射对人体和环境的伤害,也要求降低发射概率。移动台发射功率能量的限制,也导致对其复杂信号处理算法上的约束。在上述情况下,发射概率会随之降低,传输质量和覆盖范围也会随之降低。这将导致要增加更多的接入端口,比如增加昂贵的基础网络设备。同样,需要平衡功率要求和基础设备密度之间的关系,频谱带宽和功率是相互制约的。图 1.2 说明了三者之间的制约关系。

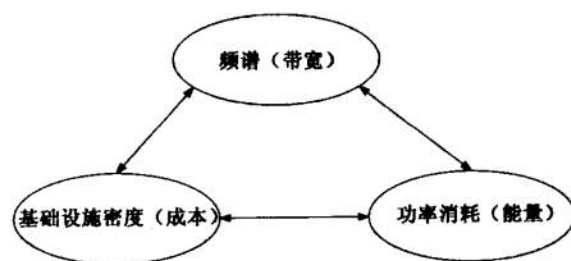


图 1.2 无线网络设计中的制约因素

参考文献

- [1] Zander., radio resource management for wireless network

第2章 干扰信道中的链路特性

2.1 多用户接入无线通信系统

2.1.1 问题引述

典型的通信系统理论主要是处理点对点连接，其中的干扰为高斯分布的热噪声，但很难预测传输环境的恶化以及信道的变化。真实的无线系统还需要关注其他问题。事实上，现代通信系统的共性是没有无线链路并且系统是独立存在于分配的频带内。或远或近的其他无线发射机，将始终产生干扰。干扰在多数情况下，都将损害系统的运行性能。从马科尼时代开始，频谱上的负荷不断在增加。正如第1章所讨论的一个关键问题，如何有效利用频谱资源，将干扰造成的影响降到最低，我们有办法消除干扰或是降低它对运行造成的损失吗？

广义而言，无线传输媒质是一种广播媒质。在无线网络中，一定区域内的用户将以如图2.1所示的方式进行通信。对任意大量的用户来说，这种方式是有益的，可以在用户之间快速地建立连接。图2.1中的粗黑线表示三个发信机对收信机的通知信息。称这些链路为活动通信链路。尽管有相互间的干扰，通信的无线频谱资源还是由各个用户共享。三个发信机的信号对于相互连接带来了干扰，在图2.1中用浅灰线表示。干扰特性取决于产生干扰的发射机选择的波形和发射功率，以及交叉链路的传播环境。对于活动通信链路，干扰不仅取决于发信机的波形、功率和活动链路传播环境，还取决于接收机的检测技术。我们采用两个步骤来简化对这种无线网络的分析。首先，在接收机端干扰表示为相应的接收功率和对传播条件造成的影响。其次，分析干扰对活动链路性能造成的影响。本章讨论后一个步骤。

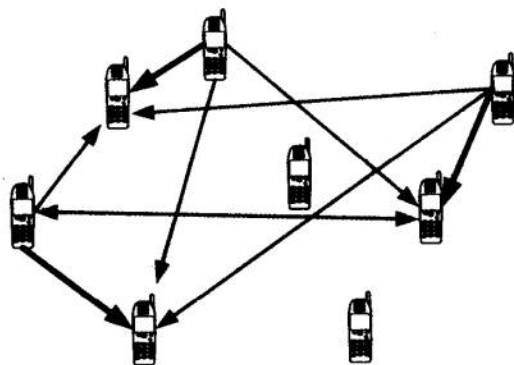


图 2.1 无线网络

为了评估干扰对性能的影响，我们研究网络中的一条链路。我们用图2.2中的多接入信道模型来进行研究。该模型是对经典通信理论中的 M 个发射机的扩展情形。接收机的功能是从相关活动链路中检测出一条链路的发送信号 $s_0(t)$ 。当信号被接收时，其他 $(M-1)$ 条链路上的信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M-1}(t)$ 也在空中传输，同时对该接收信号产生干扰。除了这 $(M-1)$ 个发信机外，还有可能来自使用相同频率范围的无线系统的干扰。

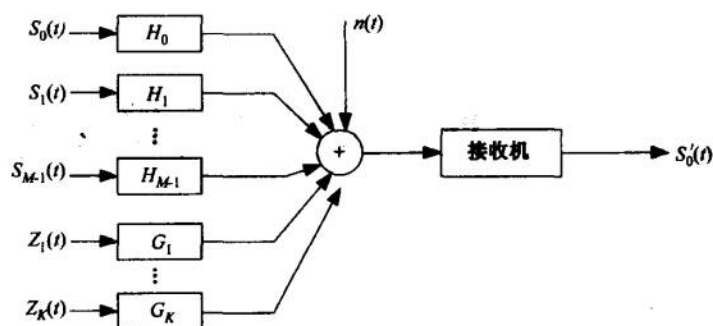


图 2.2 多用户无线系统的信号与干扰模型

最后对于故意使链路中断的干扰也要加以考虑。假设当前有 K 个这样的附加信号，分别表示为 $z_1(t), z_2(t), \dots, z_K(t)$ 。根据经典的通信理论，接收机受限于热噪声。

在很多情况下，当干扰占主要因素时，可以不考虑热噪声，并称之为干扰受限系统。反之，称为噪声受限系统，这种系统除了在空间通信时会遇到之外，通常比较少见。

区分不同用户的方法有两种：复用技术和多接入机制。复用可以描述为从不同信号源中选取信号并加以组合。通常在一个地方处理，比如在电话交换机或是承载大量呼叫的微波链路上。设计复用问题从根本讲，就是在星座图的信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M-1}(t)$ 中选取满足性能要求的信号。

不同系统对于性能的判断依据是不同的，但从原理上讲，它们都遵循经典通信理论。就是要在满足一定要求的同时，有尽可能快的传输速率，减少信号失真。对于数字通信系统，误比特率或误码率以及传输时延作为衡量系统的性能指标。对于多用户系统来讲，还有一个不同于点对点系统的性能指标，即在给定带宽情况下，系统能够同时容纳多少用户。多用户系统的性能取决于对信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M-1}(t)$ 的选取。2.2 节将进一步讨论这个问题。

本章最后将涉及多接入问题。大量用户的重叠信号不是在一台设备中处理的，而是在空中分布处理（如图 2.2 所示）。对于单纯的信号处理问题，还会遇到同步以及消息传输协同的情况。下面就对此加以讨论。

2.1.2 多用户系统信号设计

在很多方面，设计多用户系统的通信信号与设计传统的点对点系统是完全不同的。我们通过讨论在多用户系统中的各种不同信号中探测最优信号的策略，来研究它们之间的差异。为简便起见，我们把研究对象锁定在数字通信的二进制信号上。当然，对于模拟系统或采用多级调制方式的数字系统也会得出类似的结论。还有一个假设是，系统采用双极信号，即发射机发射的信号相互独立，其形式如下：

$$s_i(t) = a_i u_i(t) \quad a_i = \pm 1 \quad (2.1)$$

为简化起见，假设收信机是线性系统，信道滤波器的响应是平坦的，可以表示为乘以一个常数 h_i ，接收信号 $r(t)$ 可以写做：

$$r(t) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i h_i u_i(t) + \sum_{j=1}^K z_j(t) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i h_i u_i(t) + z(t) \quad (2.2)$$

假定发送信息符号 $a_0 = +1$ ， $z(t)$ 是 K 个干扰信号之和。需要考虑信号 $s_0(t)$ 或信号 $-s_0(t)$ 是否为归零化传输。式 (2.2) 可以重新写做：

$$r(t) = a_0 h_0 u_0(t) + \sum_{i=1}^{M-1} a_i h_i u_i(t) + z(t) = a_0 h_0 u_0(t) + z'(t) \quad (2.3)$$

$z'(t)$ 由干扰信号 $z(t)$ 以及与 a_0 不相干的其他信号组成。可见 $z'(t)$ 与传输信息不相干，可以看做噪声。

采用通信理论中的标准向量空间进行类比，接收信号向量 r 由信号向量 $a_0 h_0 u_0(t)$ 与噪声向量 $z'(t)$ 构成，如图 2.3 所示。假如信息符号 ± 1 出现几率相同，接收机选择符号 a 收到最小误码率时，接收到向量 r 的概率也最大。在式 (2.4) 的情况下，最大相关检测器 (ML) 选择符号 $a_0 = 1$ ，否则选择 $a_0 = 0$ 。

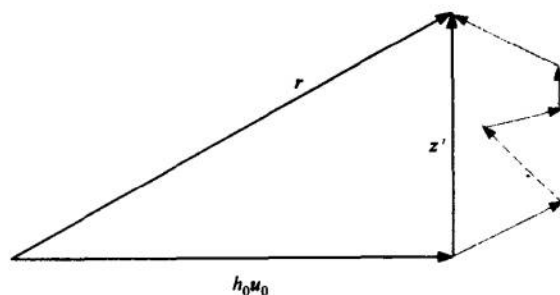


图 2.3 多用户环境下的信号向量空间示意图

$$p_r(r | a_0 = +1) > p_r(r | a_0 = -1) \quad (2.4)$$

如果常数 h_0 已知，那么 z' 是接收向量 r 的惟一随机项。由于 $z' = r - a_0 h_0 u_0$ ，改写上式，表示 z' 的概率密度为：

$$p_r(r | a_0 = +1) = p_{z'}(r - h_0 u_0) > p_{z'}(r + h_0 u_0) = p_r(r | a_0 = -1) \quad (2.5)$$

考虑下面的特殊情况，对于 z' 的概率密度：

- i) 只依赖于 $|z'|$;
- ii) $|z'|$ 单调下降;

在高斯噪声情况下，ML 检测器优化接收信号是为了减少接收到的 $|r - a_0 h_0 u_0|$ 信号，也就是选取接近向量 r 的信号 $a_0 h_0 u_0$ 。在这种特殊的情况下，对于相关检测过程而言，向量 r 随着 u_0 而变化。这种情况的最优检测器称为相关检测器，采用匹配滤波。信号向量的互相关值，即由向量 $r \cdot u_0$ 的内积得到的估计值为：

$$\hat{a}_0 = \text{sgn}(r \cdot u_0) \quad (2.6)$$

一般的情况并不满足条件 i) 和 ii)。在特殊情况下，干扰发射机数量较少，或者在噪声项 z' 中干扰项较少。后一种情况在无线通信的情形中比较常见。有趣的是，在一些情况下，条件 i) 和 ii) 都会得到满足。例如，最常见的是 $z'(t)$ 包含的信号成分携带的功率差异较大。在这种情况下，根据中心极限定理， z' 可以看做零均值的高斯向量，满足条件 i) 和 ii)。在这种极端情况下，式 (2.6) 所表示的接收信号是最优的。

例 2.1

设探测到的 BPSK 信号波形如下：

$$s_0(t) = a_0 \sqrt{\frac{2E_0}{T}} \cos(2\pi \frac{t}{T}) \quad 0 \leq t < T$$

接收到的信号被如下的 PSK 调制信号所干扰：

$$s_1(t) = a_1 \sqrt{\frac{2E_1}{T}} \cos(2\pi \frac{t}{T} + \phi) \quad 0 \leq t < T$$

其他干扰和噪声可以近似地采用加性高斯白噪声 $n(t)$ 表示, 其谱密度为 $N_0/2$ 。信息符号 $a_i \in \{+1, -1\}$ 相互独立且概率相等。则接收信号可以写做:

$$r(t) = s_0(t) + s_1(t) + n(t)$$

问: (1) 根据式 (2.6) 的相关检测器得到的误比特率为多少?

(2) ML 相关检测器的最优值为多少?

解答:

(1) 假设传输的符号是 $a_0 = +1$ 所接收到的向量模型, 如图 2.4 所示。相关接收机用向量 r 在 u_0 方向的投影来进行判断。如果 r 落在错误半平面, 则判断为收到错误信号。假设符号 $a_0 = +1$ 被发送, 如果向量 r 在 u_0 方向的投影为负, 则判断出错。

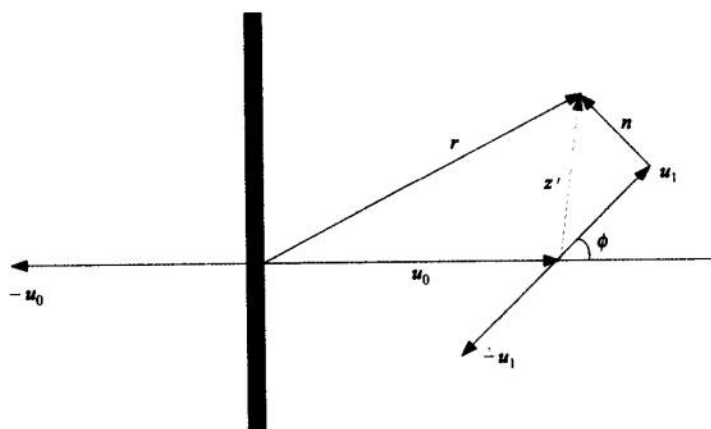


图 2.4 例 2.1 的信号星座图

投影用内积的方式表示为:

$$r \cdot u_0 = a_1 \sqrt{E_1 E_0} \cos \phi + \sqrt{\frac{E_0 N_0}{2}} n_c$$

这里 n_c 为均值为 0 的随机变量, 其方差是单一的。上式除以 $\sqrt{E_0 N_0}/2$ 得到负值, 则判断出错。

$$n_c < -\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}} - a_1 \sqrt{\frac{2E_1}{N_0}} \cos \phi$$

这种情况的概率为:

$$P(\text{error} | a_0 = +1; a_1) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}} + a_1 \sqrt{\frac{2E_1}{N_0}} \cos \phi\right)$$

因为 a_1 可以等概地取 +1, -1 两个值, 对于 $a_0 = -1$ 的情况可以对称地写出判断出错的概率为:

$$P_e = \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}} + a_1 \sqrt{\frac{2E_1}{N_0}} \cos \phi\right) + \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}} - a_1 \sqrt{\frac{2E_1}{N_0}} \cos \phi\right)$$

注意, 对于干扰信号与 u_0 正交的情况, 这时 $\cos \phi = 0$, 对于出错概率的结论没有影响, 只有高斯噪声而没有干扰。