



Communication  
Network Technology

现代通信网络技术丛书

# 移动通信 无线网络设计

- ◇ 无线网络与电路设计必需的电波传播预测模型与相关数据
  - ◇ CDMA与3G系统无线电资源的合理指配和使用
  - ◇ 移动网络、基站和小区的无线工程设计
- ◇ 如何解决无线网内同频和互调干扰问题, 以及频率复用

谢益溪 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

现代通信网络技术丛书

移动通信网络设计

# 移动通信 无线网络设计

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

移动通信无线网络设计 / 谢益溪编著. -- 北京 :  
人民邮电出版社, 2011. 1  
(现代通信网络技术丛书)  
ISBN 978-7-115-22734-8

I. ①移… II. ①谢… III. ①移动通信—通信网—设计  
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第177928号

## 内 容 提 要

本书详细介绍了移动通信无线网络的设计, 主要内容包括: 无线通信系统的架构, 无线网络与电路设计必需的电波传播预测模型与相关数据, 电波传播与无线通信的关系以及无线网络与电路设计, 频率资源和 CDMA 与 3G 系统无线电资源的合理指配和使用, 无线网络、基站和小区的无线工程设计, 无线网内同频和互调干扰以及频率复用问题等。相关的设计内容都给出了完整、实用的计算公式, 可以直接应用于无线通信工程设计计算。

本书的主要读者对象为从事无线电通信网络规划、设计、优化与系统维护的技术人员, 从事无线电通信系统与网络设备研究、制造的人员, 从事无线电管理的人员以及高等院校无线电通信专业的师生等。

现代通信网络技术丛书

### 移动通信无线网络设计

- 
- ◆ 编 著 谢益溪  
责任编辑 梁 凝
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 18.75  
字数: 449 千字 2011 年 1 月第 1 版  
印数: 1-3 000 册 2011 年 1 月河北第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-22734-8

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

在无线通信系统的整体架构中，无线网络与无线电路是无线通信区别于有线通信的最具特色的核心组成部分，是决定无线通信系统业务容量、通信质量和投资成本的关键，也是系统规划、设计与优化升级改造中的难点所在。这里提到的困难主要来源于射频信号在无线信道传输（或者说得更明白一点，以无线电波形态出现的射频信号在自然环境中传播）时，其众多特性参数的不确定性以及它与自然、地理、地形、气象和人为环境等千差万别的外界条件之间的复杂关联性。

我国的无线电通信事业发展到今天这种规模 and 水平，从事移动通信和固定通信系统的研制、生产、规划、设计和运行维护以及科研、教学的人们可能早就希望能有一本有关无线网络和无线电路设计的专业书，它能够提供系统完整、简洁有效、实用可靠的设计方法，可进行实际操作计算，得到有用而可靠的结果。可是，一直到现在，似乎还没有这样一本专著，能够提供无线网络与无线电路设计的基础知识，系统、全面、实用而可靠。

我们面对的情况是，一方面，这样的专著似乎无处可寻；另一方面，在通信工程实践中大量使用的无线网络与电路规划设计与优化软件系统，我们也只能见到其操作界面而不能见到软件的内核。软件系统核心的底层技术我们无从得知，无线传输信道的电波传播模型与特性分析、场强预测计算和干扰分析以及与此相关联的无线网络与无线电路参数的规划、优化设计或参数的设定是如何得到的，如何进行的，我们也无从知晓，我们只能接受软件系统给出的最终结果，无法给出理性的质疑和量化的评价。

我国无线电通信的规模已经非常庞大。作者在长期的研究与工程实践中，感觉到合理设计无线电通信网络与电路的必要性和紧迫性。好的设计是诞生好产品的必要条件，好的设计可以降低前期的生产成本和减少后期的修补维护等费用。事实上，无线通信网络与无线电路是一个无形的产品，人们可能根本意识不到它们的存在，但却必定被动地接受其产生的后果。写这本书仅是个尝试，希望尽自己的努力，能够呈献给读者一本理性和实用的书籍，一方面希望对我国无线通信业界有所裨益，另一方面也期盼得到来自各方面的指正。

除去第1章，全书内容主要包含五类内容。第一类包括第2章和第3章，是有关无线网络与电路设计必需的电波传播预测模型与相关数据，包括地面的反射效应、障碍的绕射损耗以及大气气体吸收与降雨衰减的预测计算模型等。第二类是第4章和第5章，是有关无线电路的设计问题，分别为超短波和微波的电路设计。第三类是有关频率资源和CDMA与3G系统无线电资源的合理指配和使用的问题，主要包括第6章和第10章。第四类是无线网络、

基站和小区的无线工程设计，包括各种公用和专业移动通信系统以及 CDMA 与 3G 系统，主要包括第 8 章和第 9 章。第五类是关于无线网内同频和互调干扰以及频率复用的问题，还有边界和边境地区网间的干扰与频率协调的问题，主要包括第 7 章和第 11 章。第 1 章是概括性地评述无线通信的架构，电波传播与无线通信的关系以及无线网络与电路设计的主要内容。

书中有关工程设计的内容都给出了完整、简洁和实用的计算公式，其中参数的定义和单位都很明确，可以直接应用于无线通信工程设计。

感谢中国电子科技集团第 22 研究所科技委主任焦培南研究员和奚迪龙研究员对本书的鼎力推荐，感谢郑名源研究员、王先义研究员和余运超研究员的宝贵意见和热心帮助，同时，还要感谢给予我帮助和鼓励的同事和单位领导。

作者

2009 年 8 月于青岛

## 作者介绍

谢益溪，1938年生，江西瑞金人，1962年毕业于武汉大学物理系，中国电波传播研究所研究员，中国通信学会会士，中国电子学会高级会员，研究生导师，享受国务院颁发的政府特殊津贴。1965年5月至1998年10月，在中国电波传播研究所从事精密无线电定位测速系统大气折射修正的理论、实验



和工程应用研究、无线电管理中的电波传播技术支持、超短波微波传播研究以及无线电通信系统工程设计与电测工作，此前在原国防科委第十研究院第19研究所从事对流层散射、无线气象与大气折射研究。1998年10月至2005年10月，在深圳从事无线电管理中电磁兼容分析系统的开发与传播模型和算法研究以及移动通信无线网络规划设计软件系统的研发工作。2005年11月起在中国电波传播研究所（青岛）工作，从事无线电波传播研究、无线网络与电路设计以及无线电干扰与兼容分析研究。独著或与国内外学者合著出版了《无线电波传播（超短波、微波、毫米波）》、《Microwave and Millimeter Wave Propagation》、《现代无线电通信知识讲座》和《无线电波传播——原理与应用》等四部著作。现在的专业兴趣是无线电波传播、通信系统无线网络与电路的规划设计、复杂电磁环境无线电干扰协调与兼容性分析以及与此相关的软件系统开发等。



# 目 录

第 1 章 绪论	1	2.7.1 半无限吸收屏绕射的波动解	37
1.1 无线通信业务的分类与架构	1	2.7.2 半无限吸收屏绕射损耗的近似表达式	37
1.2 无线通信业务与电波传播模式	4	2.8 地面电路半无限屏绕射场的几何光学解	38
1.3 射频信道的传输特性	8	2.8.1 地面电路半无限屏绕射场的几何光学解 <sup>[4],[5]</sup>	38
1.4 无线网络与电路设计	11	2.8.2 绕射损耗的几何光学解与波动解的一致性 <sup>[4],[5]</sup>	40
1.5 无线电干扰与兼容性分析	17	2.8.3 几何光学解与波动解近似公式的一致性 <sup>[8],[11]</sup>	42
参考文献	18	2.8.4 几何光学近似条件的定量表达 <sup>[8],[11]</sup>	42
第 2 章 地面地物对电波传播的影响	19	2.9 多屏绕射场和绕射损耗的几何光学解 <sup>[8],[11]</sup>	43
2.1 无线电波传播的地面环境	19	2.9.1 二屏绕射损耗的几何光学解	43
2.1.1 地面环境对电波传播的影响	19	2.9.2 三屏绕射损耗的几何光学解	45
2.1.2 陆地地形与环境分类	19	2.9.3 多屏绕射损耗的几何光学解	46
2.1.3 海面分类	21	2.10 绕射损耗的经验预测模型 <sup>[12],[13],[14]</sup>	46
2.2 镜反射和漫反射	21	2.10.1 实用的绕射障碍物分类	46
2.3 地反射的几何参数	23	2.10.2 经验的绕射损耗预测模型	47
2.3.1 等效反射平面与等效高度	24	参考文献	49
2.3.2 地反射射线的掠射角	24	第 3 章 对流层大气及其沉降物对电波传播的影响	50
2.3.3 地反射射线的出射角和到达角	25	3.1 地球大气	50
2.3.4 直接射线的出射角和到达角	25	3.1.1 对流层	51
2.3.5 反射点的位置和反射面的费涅尔区	26	3.1.2 同温层	51
2.4 反射系数与反射损耗	27	3.1.3 电离层	51
2.4.1 费涅尔反射系数	27	3.2 对流层气象的统计特性	52
2.4.2 反射系数的幅度与相位	29	3.2.1 温度	52
2.4.3 地反射射线和直接射线之间的程差与时延	30	3.2.2 气压	52
2.4.4 地反射损耗	30	3.2.3 湿度	53
2.5 地形剖面与绕射传播效应	31	3.3 中国大陆地区气候的特征 <sup>[2-5]</sup>	53
2.5.1 地形、地物对电波传播的阻挡	31	3.4 降雨、云雾和沙尘特性	54
2.5.2 地形剖面与地球凸起	32	3.4.1 降雨特性	54
2.6 传播电路余隙与电路的几何参数	33		
2.6.1 电路距离 <sup>[8]</sup>	33		
2.6.2 电路的方位角 <sup>[8]</sup>	34		
2.6.3 电路余隙与相对余隙 <sup>[4],[5],[8]</sup>	35		
2.7 半无限吸收屏绕射场的波动解	37		

3.4.2	云雾特性 <sup>[2],[8]</sup> .....	55	4.6.5	衰落储备与衰落余额.....	88
3.4.3	沙尘暴和沙尘特性 <sup>[2],[5]</sup> .....	56	4.6.6	电路设计的逻辑流程图.....	88
3.5	大气吸收.....	57	4.7	VHF/UHF 频段电路设计计算举例.....	89
3.5.1	大气吸收的物理过程.....	57	4.7.1	电路几何参数与视通图.....	89
3.5.2	氧气吸收衰减率.....	60	4.7.2	接收信号电平的设计计算结果.....	91
3.5.3	水汽吸收衰减率.....	62		参考文献.....	92
3.6	地面电路大气吸收模型.....	63	<b>第 5 章 微波通信无线电路设计</b> .....		94
3.7	地面电路雨衰减.....	64	5.1	引言.....	94
3.7.1	地面电路 0.01%时间被超过的 雨衰减.....	65	5.2	需要输入的已知参数.....	95
3.7.2	地面电路 $p$ %时间被超过的 雨衰减.....	66	5.2.1	基本已知参数.....	95
3.8	云、雾衰减预测模型.....	66	5.2.2	地形剖面数据.....	97
3.8.1	云、雾物理模型.....	66	5.3	电路视通设计.....	97
3.8.2	云、雾衰减率 <sup>[8],[13]</sup> .....	67	5.4	反射点位置与反射损耗的计算.....	98
3.8.3	云、雾衰减预测模型 <sup>[8],[13]</sup> .....	68	5.5	大气吸收损耗.....	98
	参考文献.....	69	5.6	雨衰减.....	99
<b>第 4 章 超短波通信无线电路设计</b> .....		70	5.6.1	0.01%时间被超过的雨衰减 <sup>[3]</sup> .....	99
4.1	点对点传播模型.....	70	5.6.2	$p$ %时间被超过的雨衰减.....	100
4.2	已知参数.....	71	5.7	多径衰落.....	100
4.3	电路视通设计.....	73	5.8	接收电平与衰落储备预测.....	101
4.3.1	地理环境与地形剖面.....	73	5.8.1	正常基本传输损耗与正常 接收电平.....	101
4.3.2	电路的距离与方位角和俯仰角 <sup>[2]</sup> .....	74	5.8.2	$p$ %时间的基本传输损耗与 接收电平.....	102
4.3.3	直接射线、费涅尔椭圆与等效 地球表面.....	76	5.9	分集设计与分集改善度.....	103
4.3.4	主障碍与电路余隙.....	77	5.9.1	空间分集间隔与分集改善度.....	103
4.4	反射点位置与地反射射线作图.....	78	5.9.2	频率分集改善度.....	104
4.4.1	反射点到发射站和接收站的 水平距离.....	79	5.10	微波电路设计程序.....	105
4.4.2	入射线和地反射线的作图.....	80	5.11	微波电路设计实例.....	106
4.5	传播损耗.....	80	5.11.1	电路视通图.....	106
4.5.1	自由空间与自由空间损耗.....	80	5.11.2	主障碍点和反射点位置.....	107
4.5.2	绕射损耗.....	81	5.11.3	电路工程数据表.....	107
4.5.3	地反射损耗.....	83	5.11.4	接收电平统计.....	108
4.6	接收场强和电平计算.....	83	5.11.5	几何参数.....	109
4.6.1	功率通量密度、场强和 接收电平 <sup>[12]</sup> .....	83		参考文献.....	109
4.6.2	接收场强和接收电平的中值.....	85	<b>第 6 章 移动通信的信道规划与 频率指配</b> .....		111
4.6.3	衰落深度.....	86	6.1	陆地移动通信业务的频率资源 <sup>[10]</sup> .....	112
4.6.4	$T$ %时间场强与接收电平.....	87	6.1.1	移动通信业务的频带划分.....	112
			6.1.2	GSM 900/1800 系统的	



频率资源·····	113	7.1.2 三信号合成非线性失真·····	145
6.1.3 CDMA (IS-95) 系统的		7.1.3 可能产生互调干扰的谐波分量·····	148
频率资源·····	115	7.2 互调频率组的鉴别 <sup>[4]</sup> ·····	148
6.1.4 集群移动通信系统的频率资源·····	116	7.2.1 互调干扰的频率关系·····	148
6.1.5 PHS 无线市话系统的频率资源·····	118	7.2.2 鉴别互调干扰频率组的	
6.1.6 3G 移动通信系统的频率资源·····	118	算法设计·····	150
6.2 频率资源管理·····	119	7.3 互调干扰的产生机制与分类·····	153
6.2.1 频带划分·····	119	7.3.1 互调产物·····	153
6.2.2 频道规划·····	121	7.3.2 发射机互调产物引起的	
6.2.3 频率分配·····	121	互调干扰·····	155
6.2.4 频率指配·····	122	7.3.3 接收机互调产物引起的	
6.3 无线网话务业务的信道与频率规划·····	123	互调干扰·····	155
6.3.1 话务量估算·····	123	7.4 查找引起接收机互调干扰的信号 <sup>[7]</sup> ·····	156
6.3.2 无线网和小区的信道与频率		7.4.1 可能对接收机产生干扰的	
需求规划·····	124	互调产物·····	156
6.4 GPRS 业务的信道与频率规划·····	125	7.4.2 互调产物频率检验算法与	
6.4.1 GPRS 业务信道规划 <sup>[1]</sup> ·····	125	逻辑流程图·····	156
6.4.2 GPRS 业务的频率规划与		7.5 同站址互调干扰所要求的空间	
覆盖设计·····	127	隔离度 <sup>[3]</sup> ·····	159
6.5 无线网络的自动频率指配 <sup>[8]</sup> ·····	127	7.5.1 收发天线间的水平隔离距离的	
6.5.1 无线电干扰与频率指配·····	127	计算·····	159
6.5.2 自动频率指配的已知		7.5.2 收发天线间的垂直隔离距离的	
条件和任务·····	128	计算·····	161
6.5.3 电磁兼容矩阵·····	129	7.6 接收机互调干扰电平的计算 <sup>[5,9]</sup> ·····	162
6.5.4 频道需求向量与频道状态矩阵·····	130	7.6.1 接收机互调干扰产物的电平·····	162
6.5.5 频道排序·····	131	7.6.2 干扰判决·····	164
6.5.6 频率指配·····	131	7.6.3 接收机互调干扰计算举例·····	165
6.5.7 频率自动指配的逻辑流程与		7.7 发射机互调干扰信号的覆盖范围 <sup>[3]</sup> ·····	166
指配举例·····	133	7.8 陆地移动业务接收机互调干扰	
6.6 移动通信系统跳频算法与跳		分析 <sup>[6,8]</sup> ·····	167
频序列设计 <sup>[9]</sup> ·····	133	7.8.1 互调干扰频率组的检验·····	167
6.6.1 跳频算法·····	134	7.8.2 陆地移动通信业务的保护场强和	
6.6.2 慢跳频 (SFH) 系统频率指配·····	137	保护比·····	168
6.6.3 慢跳频 GSM 系统的容量·····	139	7.8.3 计算互调干扰信号的平均场强·····	169
6.6.4 跳频系统频率指配的计算与		7.8.4 干扰保护余额和干扰判决·····	169
应用举例·····	140	参考文献·····	170
参考文献·····	141	<b>第 8 章 基站与小区的无线</b>	
<b>第 7 章 无线通信的互调干扰问题</b> ·····	143	<b>工程设计</b> ·····	171
7.1 非线性效应 <sup>[3]</sup> ·····	143	8.1 传播模型与场强分析·····	171
7.1.1 二信号合成非线性失真·····	143	8.1.1 点对点统计传播模型·····	171

8.1.2	点对点传播模型	177	9.2.5	CDMA 系统各信道所要求的载噪比门限	212
8.1.3	接收点场强和接收电平的计算	179	9.2.6	小区容量与信道规划举例	214
8.2	接收机灵敏度与保护场强	181	9.3	CDMA 系统基站覆盖区优化设计与仿真	215
8.2.1	电压灵敏度与功率灵敏度	181	9.3.1	CDMA 系统基站覆盖区优化设计的特点	215
8.2.2	天线噪声	182	9.3.2	CDMA 系统基站覆盖区优化设计和仿真	216
8.2.3	接收机热噪声与接收机最大可用灵敏度	182	9.3.3	场强模型	216
8.2.4	静态接收机灵敏度	182	9.3.4	导频信道和前向业务信道所允许的最低场强	217
8.2.5	噪声、门限电平与保护场强	183	9.4	CDMA 系统无线网导频 PN-offset 指配 <sup>[14]</sup>	218
8.3	基站覆盖区的优化设计 <sup>[23]</sup>	184	9.4.1	引言	219
8.3.1	引言	184	9.4.2	最小同 PN-offset 复用距离	219
8.3.2	输入数据表	185	9.4.3	导频偏置指数的最小间隔	220
8.3.3	软件逻辑框图	186	9.4.4	一个区群内的小区数	222
8.3.4	输出数据图表	190	9.4.5	区群结构	222
8.4	基站覆盖区的仿真分析 <sup>[24]</sup>	191	9.4.6	小区导频相位矩阵与偏置指数向量	224
8.4.1	引言	191	9.4.7	偏置指数值的分配	224
8.4.2	覆盖区仿真的功能	192	9.4.8	PN-offset 指配逻辑流程	225
8.4.3	输入数据	192	9.5	反向链路覆盖设计 <sup>[15]</sup>	225
8.4.4	数学模型与算法设计	193	9.5.1	引言	225
8.4.5	输出图形与数据表格	196	9.5.2	基站允许的最低接收电平	225
8.4.6	移动通信无线覆盖方式的多样性	197	9.5.3	基站最低接收电平计算举例	227
8.5	室内覆盖分析	199	9.5.4	反向业务信道所要求的最小发射功率	227
8.5.1	室内传播模型	199	9.5.5	移动台所需最小发射功率计算举例	228
8.5.2	建筑物外墙的穿透损耗	201	9.5.6	反向覆盖算法设计	230
8.5.3	场强与接收电平计算	201	参考文献	230	
参考文献		202	第 10 章	3G 与多业务系统信道和频谱需求规划	232
第 9 章	3G 和 CDMA 系统无线网络规划设计	204	10.1	3G 系统特点	232
9.1	CDMA 系统的多址方式与信道结构	204	10.2	3G 系统的频段	232
9.1.1	伪随机系列与 Walsh 函数 <sup>[1]</sup>	204	10.3	3G 与多业务系统地面频谱需求量计算	233
9.1.2	CDMA 移动通信系统的信道结构 <sup>[16]</sup>	205	10.3.1	计算频谱需求量的总公式	233
9.2	CDMA 系统无线网业务容量和信道规划 <sup>[13]</sup>	210			
9.2.1	引言	210			
9.2.2	信道规划	210			
9.2.3	容量规划	212			
9.2.4	多频共用的容量	212			

10.3.2	蜂窝面积	234	11.3.2	干扰信号场强的计算	261
10.3.3	用户数量与每用户的业务量	235	11.3.3	保护场强和保护电平	262
10.3.4	每小区和每区群的业务量	238	11.3.4	干扰判据	263
10.3.5	每元小区和每区群所需要的 信道数	239	11.4	网内同频干扰的预测计算 <sup>[15]</sup>	265
10.3.6	每元小区各业务所要求的 比特速率	241	11.4.1	引言	265
10.3.7	频谱需求估算	242	11.4.2	输入参数	266
10.3.8	频谱需求计算流程	244	11.4.3	蜂窝网的频率复用与载干比 计算	267
10.4	输入参数	245	11.4.4	有用信号和干扰信号的传播 路径长度与方位角	269
10.5	输出结果	246	11.4.5	算法设计与计算举例	270
	参考文献	246	11.5	网内同频干扰的简单评估 <sup>[16]</sup>	272
<b>第 11 章 陆地移动通信网的干扰与 协调</b>			11.5.1	引言	272
11.1	频率复用	247	11.5.2	场强模型	272
11.1.1	区群结构与频率复用距离	248	11.5.3	载干比的表达式	273
11.1.2	允许的最小频率复用距离	251	11.5.4	干扰信号距离的计算	274
11.2	干扰隔离度 <sup>[4]</sup>	253	11.5.5	各类移动通信系统的干扰 评判标准	276
11.2.1	自由空间干扰隔离度	253	11.6	移动通信网间的边界协调	278
11.2.2	随机信号与时间和地点概率	254	11.6.1	干扰与协调	278
11.2.3	干扰隔离度的一般表达式	256	11.6.2	频率协调协议的一般内容	279
11.2.4	允许的最小隔离度	258	11.6.3	协调程序与数据资料交换的 项目与格式	279
11.3	干扰电平和干扰场强以及干扰 判据 <sup>[5]</sup>	260	11.6.4	协调区的界定	279
11.3.1	干扰信号电平的计算	260	11.6.5	用频协调	280
			11.6.6	无线电协调的技术标准	282
			11.6.7	干扰处理	284
				参考文献	285

# 第 1 章

## 绪论

无线通信是在信息发射起始端与接收终端之间的信息传输链中至少有一段链路没有实体线缆连接却能实现远距离信息交流的一种通信方式，这段没有实体线缆连接却可以传输信息的链路就是无线电路。在无线电路上，靠的是无线电波，即使用无线电波发射、传输和接收人为的或自然的信息，包括声音、图像、数据、文字、符号和信号等。事实上，所有的无线通信业务或无线通信系统，在实现其通信功能的完整的信息传输过程中，都毫无例外地要包含一段或多段无线电波传播电路，即发射天线出口与接收天线入口之间射频信号传输的无线电路，在这个无线电路上，没有任何人为的通信设备，以无线电波形态出现的射频信号仅是在外部环境中传播，只受收、发点之间外部环境的影响与约束，这也就是无线传输信道，简称无线信道或射频信道。无线信道的信息传输性能取决于电波传播的特性。无线信道是无线通信区别于有线通信的最具特色、最为关键的环节，既是影响无线通信系统的通信质量与建设投资成本的主要因素，也是无线通信系统总体设计的技术难点所在。

以上所述的外部环境包括大气、地形与下贴面（陆地还是水面，平坦还是粗糙）等自然环境，以及地面建筑物的类型、高矮和分布与城市和乡村等人为环境类型。外部环境左右着无线电波传播与无线信道的特性，这将严重地影响到无线通信系统的容量、质量、可用度和投资成本。无线信道射频信号特性的分析与预测以及无线信道的优化设计，本质上是电波传播的问题，但也与无线电通信业务的类型、通信方式和通信技术体制等因素密切相关。

事实上，本书的主题就是，基于无线传输信道（射频信道）的特性分析与预测，即基于收、发站之间无线电波传播特性的相关知识，研究、介绍和提供无线电移动和固定通信业务中无线网络和无线电路设计的相关程序、方法、数据和物理数学模型。

本章概括性地讨论一下与无线电通信业务相关联的几个全局性问题，即无线电通信业务的分类与架构、无线电通信业务与电波传播模式的关联性，无线信道的传输特性，无线网络与无线电路设计，以及无线电干扰、协调与兼容分析等。

### 1.1 无线通信业务的分类与架构

20 世纪初，意大利发明家马可尼极富想象力地借助于无线电波实现了跨越大西洋的简单的电报传输，同一时期俄罗斯科学家波波夫也实现了远距离的无线电信号传输。当人们还在讨论和研究这一发现的科学意义的时候，马可尼却先人一步，敏锐地意识到这一发现的实用

性与商业价值，设立通信公司，大力开展无线通信的应用开发与推广，从此展开了无线通信的广阔应用前景。

从 20 世纪初到现在无线电波被应用于无线电通信工程实践的 100 余年，无线电通信已经取得了巨大的进展，无线电通信（radio communication，习惯上，与有线通信对照，无线电通信简称为无线通信）已经广泛应用于生产、生活、科学、教育和军事等各个领域，例如，电话、电报、数据传输、声音广播、电视广播、传真、测速、定位、导航、遥控、遥测、遥感、卫星通信、标准频率和无线电授时、气象探测、安全保障、射电天文、空间研究和空间操作、地球探测、互联网数据和多媒体信息传输等。全世界的无线电台站数以亿计，每个无线电台站都在接收和/或发射自己的无线电波，实际上我们每天 24 小时都生活在无线电波的海洋里。无线通信已经成为人类现代生活不可或缺的基本要素之一，很难想象，没有无线通信的现代社会是否还能正常运转。

按定义，无线电通信是指使用无线电波发射、传输和接收任何类型的符号、信号、声音、图像、书写信息和智力产品的所有活动。这个定义是非常广泛的，涵盖了人类使用无线电波的所有通信活动，不仅仅是简单的通话和数据传输这些通常的业务。无线电通信业务可分为 3 大类型：地面无线电通信业务、空间无线电通信业务、射电天文业务。地面无线电通信业务是指发生在地面上及地球低层大气中的无线电通信业务。空间无线电通信业务是指使用了一个或多个处于地球低层大气之外的空间站的无线电通信业务，大多数的情况下空间站就是卫星。射电天文业务是一种特殊的基础性的天文科学研究业务，它不发射无线电波只是接收来自外层空间的自然无线电辐射，通常具有很高的接收机灵敏度和大的天线增益，享有专用的频带，受到特殊的保护。

下面我们将会弄清楚无线电通信业务的分类和层次划分，弄清楚无线电传输信道处于无线电通信环环相扣的完整链条中的哪一个环节是重要的，这对于借助于计算机的现代无线电管理、无线网络和电路的规划设计、干扰信号分析与协调都是必不可少的。

地面无线电通信这个大类下面，包含各种一级无线通信业务，如固定业务，移动业务，广播业务，无线电测定业务，标准频率与无线电授时业务，气象辅助业务，安全业务，业余业务等。这些一级业务下面还可以再分为若干二级业务或底层业务，比如，移动业务可以分为陆地移动业务、海上移动业务和航空移动业务等；广播业务可以再分为声音广播业务和电视广播业务；无线电测定业务可以再分为无线电定位业务和无线电导航业务；固定通信业务可以再分为微波接力通信业务、短波固定业务、对流层散射通信业务、数据传输业务和点对点通信业务等。

空间无线电通信业务除包含了与地面无线电通信类似的所有业务（如固定卫星业务，移动卫星业务，广播卫星业务等）外，另外还有不同于地面业务的新业务，例如，空间研究业务、空间操作业务、卫星间业务和地球探测业务等。

那么，底层无线电通信业务的下一层次又是什么呢？底层业务下面是系统，不同的底层业务类型，下面可包含不同的通信系统，例如，陆地移动业务包含了公众 GSM900/1800 移动通信系统、公众 CDMA 移动通信系统、公众 PHS 无线市话通信系统、公众寻呼系统、无线集群通信系统、专业移动通信系统和对讲机通信系统等。这些移动通信系统虽然都同属陆地移动通信业务，但是它们具有完全不同的技术体制和系统结构，它们还提供不一样的服务功能和服务方式，并且还具有不同的服务对象。

接着，对于固定通信和移动通信系统而言，通信系统的下层则应该是通信网络或无线网

络。通信网络和无线网络是无线通信系统在一定地理区域的具体实现，它的投资、建设、运行、维护、管理和经营都归口于一个经济实体或行政部门。当然，无线电网络之间是互联互通的，能够实现各地区、各省市、各个国家之间乃至全球的信息交流。

每个无线网络，如图 1.1 和图 1.2 所示，都包含若干个或多个无线电台站。

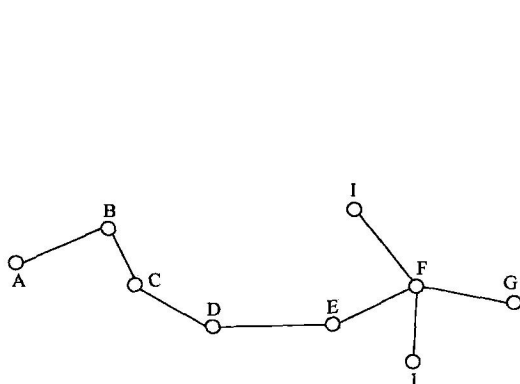


图 1.1 固定业务：点对点通信方式

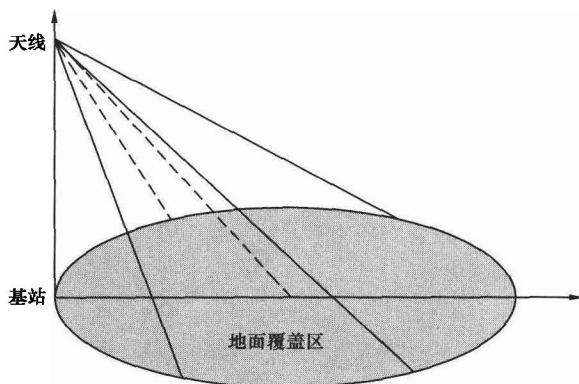


图 1.2 地面移动业务：点对面通信方式

对固定通信而言，通信方式是点对点或点对多点的，如图 1.1 所示。在这种情况下，每个无线电台站至少要对应一条无线电路，如图 1.1 中的 A、I、J 和 G 站，有时，一个台站则要同时兼顾多条无线通信电路，如图 1.1 中的 F 站，它同时面对 FE、FI、FG 和 FJ 等 4 条无线电路。必须指出的是，原则上，电路 FE 与电路 EF 并不是等效的，确切地说，电路 EF 意味着 E 站发射，F 站接收，而电路 FE 则意味着 F 站发射，E 站接收，两条电路虽然电路长度相等，但是其他参数如频率、发射功率、天线高度等电路参数也可以不同。总之，无线电路由发射站和接收站组成，收、发站之间信息的传输与交换是借助于无线电波来实现的。发射站和接收站都可通过交换机与其他有线（电缆或光缆）通信网络或无线移动通信网络相连，实现网内固定用户与网外固定和移动用户之间的信息上传与下发。

对于陆地和海上移动通信而言（如图 1.2 所示），通信方式大体上是点对面的，移动用户在基站覆盖区内是随机分布的。在这种情况下，通信网络和无线网络在覆盖地域、网络架构、经营管理和权责归属等方面来说是相对独立的业务单元。通信网络包括所谓的骨干网络和无线网络。骨干网络包括交换机、网关、识别、鉴权、控制、计费、管理等网络的核心设备并且主要以有线方式相互连接；无线网络则是由众多的基站及其覆盖小区（蜂窝小区）组成，每个基站可以有一个小区或多个小区，每个小区内都有众多的终端移动用户通过无线电波与基站相连，正在或准备与网内或网外的其他用户进行通信。基站的上端通过基站控制器和交换机与骨干网相连，将其覆盖区内终端用户的信息传输给网内或网外的其他用户；或者将网内、网外其他用户的信息传输给该基站覆盖区内的终端用户。简而言之，无线网络是由基站、基站服务小区（覆盖区）和终端用户共同组成的，它处于移动通信网络的末端。基站与移动用户之间没有实体的线缆连接，而是通过无线电波来连接的，无线电波作为信使向上和向下两个方向上同时传输相关信息，让千万个用户彼此相互沟通。

另外，还有一种通信方式，如无线电定位（雷达）业务、航空无线电导航业务和航空移动业务，是一种点对体的通信方式（这里明确提出“点对体”无线通信这个概念，以区别于点对点和点对面的无线通信方式），如图 1.3 所示。在这种通信方式中，虽然地面站是在地面

固定不动的，但是作为移动用户（目标）的飞机或导弹是在空中大范围的空域内移动的。在这种情况下，以地面固定站作为参照，移动目标的活动范围，在高度上可达数十千米，在水平方向上活动半径则可高达数千千米以上，所以，这种情况已经不能够归入上面所述的点对点和对面的通信方式了，我们不妨称之为点对体的通信方式更为贴切。而对于点对面的通信方式而言，地面上的移动用户，其天线高度只不过是数十米的量级，地面覆盖区半径极少超过百千米，特别是在城市地区，覆盖半径仅为数十、数百米的小区已很常见。

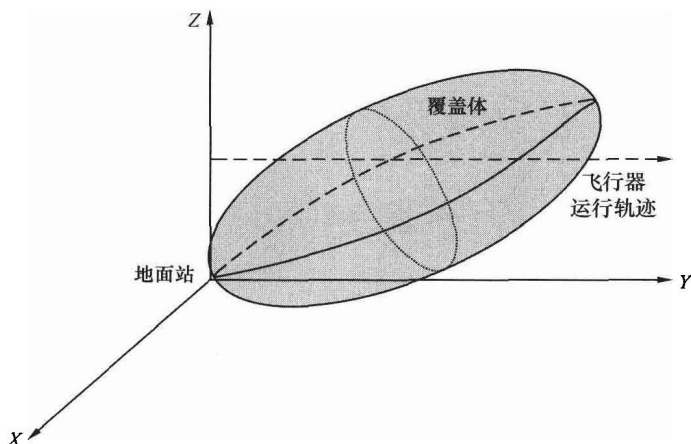


图 1.3 雷达和航空移动业务：点对体通信方式

以上关于无线电通信业务架构和层次的分析使我们对现代无线电通信业务有了一个概括性的大体了解，更重要的是，如果我们需要开发研制无线电管理、无线网络规划和无线电干扰与兼容分析等不同层次和规模的软件系统，那么，必须清晰地了解无线电通信业务的这种结构和层次关系，才能正确合理地构建软件系统的体系结构、功能结构和数据库结构。

总之，所有的无线电通信业务和通信系统，不管是点对点和点对多点的固定通信还是点对点和对体的移动通信，在实现其通信功能的完整传输过程中，都毫无例外地要包含一段或多段无线电波传输电路。无论是在固定通信的无线电路路上还是在移动通信的覆盖区或覆盖体内，发射天线口面和接收天线口面之间都是通过无线电波信号在外部环境中的传播来传输用户的相关信息。在电波传播电路上，无线电波信号在自然环境中传播，必然要受收、发天线之间自然环境的影响与约束。

## 1.2 无线通信业务与电波传播模式

毋庸置疑，无线电波传播的模式与特性是所有无线通信业务的基础。这句话似乎有点笼统，下面让我们慢慢解释。

正如文献[1],[2]中所述，无线电波只是电磁波大家族中的一个成员，电磁波是一个总称，按频率或波长来划分，电磁波可以分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽玛射线等。

无线电波是指频率低于 3 000GHz 的电磁波。无线电波频谱，若按波长来划分，习惯上，



可以分为超长波、甚长波、长波、中波、短波、超短波、微波、毫米波、亚毫米波。习惯上的称呼存在某些模糊和差异。不过,如表 1.1 所示,国际电联对无线电频谱的划分与命名已有严格的界定,表中最后一列的名称是习惯的叫法。由表 1.1 可以看出,按频率来划分,无线电波包括甚低频、低频、中频、高频、甚高频、特高频、超高频、极高频等频段,这种命名符合习惯的叫法。但是,根据国际电联按照波长的命名,无线电波可以分为万米波、千米波、百米波、十米波、米波、分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波等,这种命名与习惯叫法不完全相合,例如,几乎没有人把短波叫做十米波,也没有人把中波叫做百米波。

表 1.1 无线电波频段的划分与命名

频段编号	频段名称 (按频率命名)		频率范围 (含上限不含下限)	波长范围 (含下限不含上限)	频段名称 (按波长命名)	
	名称	缩写			ITU 命名	习惯名称
1	极低频	EHF	3~30Hz	10 000~100 000km		极长波
2	超低频	SHF	30~300Hz	1 000~10 000km		
3	特低频	ULF	300~3 000Hz	100~1 000km		
4	甚低频	VLF	3~30kHz	10~100km	万米波	超长波
5	低频	LF	30~300kHz	1~10km	千米波	长波
6	中频	MF	300~3 000kHz	100~1 000m	百米波	中波
7	高频	HF	3~30MHz	10~100m	十米波	短波
8	甚高频	VHF	30~300MHz	1~10m	米波	超短波
9	特高频	UHF	300~3 000MHz	10~100cm	分米波	微波
10	超高频	SHF	3~30GHz	1~10cm	厘米波	
11	极高频	EHF	30~300GHz	1~10mm	毫米波	
12			300~3 000GHz	0.1~1mm	亚毫米波	亚毫米波

由表 1.1 可知,微波频段从 300MHz 到 300GHz,包括很宽的频率域。实践上,通常又把微波频段再分为若干个子频段,子频段均用英文字母命名。

无线电频谱是不能人为创生的宝贵自然资源。每个无线电通信业务的信道或频道都必须占用一定的频率资源,即在一定的空间区域内独享一定宽度的频谱,例如,实现一路话音传输通常需要占用 25kHz 的频谱带宽,一路彩色电视广播需要占用 8MHz 的频带,大容量、高速率、宽带数字微波通信甚至需要占用数十兆赫兹的带宽。

通常是根据无线电波的传播特性和各种无线电通信业务的不同需要,把无线电频谱中的某些频段划分给指定的通信业务。然后,根据该种通信业务信道所需要的带宽,对划分给该业务的频段进行合理的规划,也就是说,将该频段再划分为若干等间隔的频道,供无线通信业务使用。

至于一种无线电业务究竟应占用无线电频谱的哪一个或哪一些频段,无线电规则中的频谱划分表对此有明确的规定。更准确地说,全球分为三大无线电区(粗略地说,分为欧洲区、美洲区和亚洲区),频率划分是在全球或无线电区或国家地理版图的基础上,统一地将整个无线电频谱分成许许多多频段,分别分配给不同的无线电通信业务使用,这也是预防无线电通信业务之间相互干扰的关键性措施之一。频率划分的主要技术依据是电波传播的模式与特性以及无线电业务的特性与频谱需求,以下将按频段对此作进一步的说明,解释无线电通信业务与电波传播模式和特性的关系。

### 1. 3MHz 以下的中长波频段

这包括中波、长波、甚长波和超长波等频段。这个频段总共才占有 3MHz 的带宽，可供使用的频率资源是相对有限的。中波、长波、甚长波和超长波通信的基本传播模式是地波传播，地波传播的电波相位相当稳定，而且穿越地面及其障碍物的能力很强（绕射损耗小，传播距离远），所以中波、长波、甚长波和超长波主要用于声音广播、海上导航、窄带通信业务（如电报业务）以及标准频率和时间信号业务与其他窄带业务，这些业务都只需占用比较窄的频带，但是要求电波的相位稳定，通信服务距离远。

### 2. 3~30MHz 短波频段

这是短波频段，总共占有 27MHz 的频率资源。短波通信的基本传播模式是电离层反射。在这个频段，由于电离层离地面高达 300km，依靠电离层对电波的反射效应以及地面与电离层之间形成的可使电波多次反射的管道，很容易实现超远距离的通信，通信距离可高达数千千米甚至上万千米。虽然卫星通信也可以实现超远距离的全球通信，但是，短波通信比卫星通信要简单方便得多，投资成本小，技术和工程实施都比较容易。当然，与卫星通信比较，短波通信的通信质量和通信可靠性要差一些，并且带宽和业务容量也相对有限。由于通信距离长，短波通信的频率是在全球的基础上统一划分的，不分地区和国家，大家遵循统一的频率划分方案。短波通信与卫星通信一样，比较容易受到干扰和人为的攻击。

基于短波的以上特性，这个频段主要被用于远距离固定和移动通信业务，如短波单边带和双边带话务系统，电报、传真和数传系统等，另外短波还被用于需要在远距离、超远距离和大空域范围内联络的航空、海上移动通信业务和导航业务等。

这个频段不能用于卫星通信业务，因为短波不能够穿透电离层。

### 3. 30~300MHz 超短波频段

这是 VHF 频段，也称为超短波频段，它大约占有 300MHz 的带宽。超短波与短波比较，具有足够的带宽，很容易实现具有较大话务量要求的多用户接入（如 FDMA、TDMA、CDMA 等）无线通信业务。超短波与微波比较，因其频率较低，波长较长，比较容易跨越或穿透地形和地面覆盖物（如树木和建筑物）的阻挡与遮蔽，绕射损耗较小，在低发射功率和低天线高度的条件下也可以实现较长距离的通信和较大的覆盖范围。所以，具有较大业务容量的陆地移动通信业务最早是在 VHF 频段发展起来的，包括专业移动通信、集群移动通信、无线寻呼系统、公众模拟移动通信、无线对讲移动通信以及超短波固定业务等。现在，公众模拟移动通信已经被淘汰了，并被数字移动通信所取代。而且，由于业务量的迅速膨胀而需要更宽的频带，第二代公众数字移动通信系统的频率也已调整到 900MHz 和 2 000MHz 频段。但是，专业移动通信，如公安、武警、检察院、法院、税务、银行、水力、林业等部门的专业和集群移动通信系统，以及水上、航空和安全与救灾等移动通信系统基本上仍然工作在这个频段。另外，在这个频段，还有雷达、调频广播和无线电视，这个频段已经具有足够的频率资源用来实现需要较宽频带的无线电业务。

VHF 频段的无线电波既可以轻易地穿透电离层，也不受对流层大气吸收、降雨衰减和大气噪声的影响，用于卫星通信是很合适的。对 VHF 频段的电波而言，整个地球大气几乎是完全透明的。所以，这个频段已被广泛应用于卫星陆地、航空和海上移动通信业务。但是，在 VHF 频段的低端，无线电波受电离层闪烁、法拉第旋转传播效应以及环境噪声的影响还是比较严重的。

超短波频段，由于开发时间早，系统和设备成本低廉，使用方便，频段已较为拥挤。另