



普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材

# 无线通信基础

张 炜 王世练 高 凯 朱 江 编著



科学出版社

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列教材

# 无线通信基础

张 炜 王世练 高 凯 朱 江 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书重点论述了无线通信的基本原理和基本分析方法,阐述了无线通信系统中具有普遍性和代表性的基本知识。全书共分8章,内容包括无线信道的特性、无线通信中的调制技术、正交频分复用技术、扩频通信技术、无线通信中的组网技术、无线信道的抗衰落技术及典型无线网络等。本书内容讲述清晰扼要,配有丰富的图示、例题和习题。

本书适合作为通信工程和电子信息类相关专业本科生和研究生的教材,也可作为有一定通信知识基础的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

无线通信基础/张炜等编著. —北京:科学出版社,2014.6

(普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-040768-9

I. ①无… II. ①张… III. ①无线电通信—高等学校—教材  
IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第111938号

责任编辑:潘斯斯 张丽范 / 责任校对:彭立军  
责任印制:闫磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:459 000

定价:39.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

无线通信是当今世界发展最快的工程领域之一，移动通信的发展尤其令人瞩目，在过去的几十年里涌现了大量突破性的技术成果。相对于前沿的研究成果和成功的无线通信系统，本书更侧重于无线通信的基本原理、无线通信的特性、具体的分析方法等基础知识。

本书的内容和章节的顺序安排源自编者多年的无线通信基础课程教学内容。课程遵循学生的认知规律，体现在教学上不仅是知识的传授，更是思维方法和认知过程的学习。本书内容着眼未来长远发展，强化基本理论、基本知识和基本技能的论述，体现了“由简入繁，逐步求精”以及“由个体发现规律，由规律指导个体”的学术思想。

本书面向已经掌握了通信原理、信号与系统原理、信号处理、电磁学基础等基础知识的学生和工程技术人员。本书包含了无线通信的基础理论和基本分析方法，为了着重强调概念，本书提供了较多的例题和课后习题，适合短期培训课程，移动通信初学者或相关领域人员使用。

本书共分 8 章。第 1 章对无线通信进行了综述，包括无线通信的定义、工作频段、发展历程、分类与展望等。第 2 章讲述了无线信道的特性，包括多径传播环境的特性、大尺度路径损耗与阴影衰落模型、多径信道的参数、小尺度多径衰落分类、多径衰落信道的统计特性等。第 3 章介绍了无线通信中几种典型的数字调制技术，同时简述了无线信道中数字调制的性能。第 4 章介绍了正交频分复用技术，对于 OFDM 原理、峰均功率比抑制、OFDM 传输信道估计、同步技术等问题进行了讨论。第 5 章讲述了扩频通信技术，包括直接序列扩频与跳频扩频通信的基本原理。第 6 章讲述了无线通信中的组网技术，对于多址接入技术、大区制设计、蜂窝系统设计等问题进行了讨论。第 7 章分析了无线衰落信道的容量及达到传输极限的传输方式，同时分析了减轻信道衰落对信号影响的主要技术，包括分集技术与均衡技术等。第 8 章介绍了典型的无线网络，包括蜂窝系统 GSM、IS-95、LTE 及新兴的宽带无线接入 WiMAX 技术。

根据课程长短可以灵活选择本书的章节内容，建议针对本科生课程可集中讲解第 1~6 章内容，若为低年级研究生课程则着重讲解第 2、5、6、7 章，学生可自学其他章节内容，并辅之以课程设计与实验，加强对于实际系统的了解。

本书由张炜负责全书的统稿。具体编写分工如下：朱江编写第 1 章，张炜编写第 2 章、第 3 章、第 6 章和附录，王世练编写第 4 章和第 5 章，高凯编写第 7 章和第 8 章。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，欢迎读者指正。

编 者

2014 年 3 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 无线通信的定义与发展简史.....	1
1.2 无线通信的频段与传播方式.....	3
1.3 无线通信的特点与关键技术.....	7
1.3.1 无线通信的特点.....	7
1.3.2 无线通信的关键技术.....	7
1.4 无线通信的类型与发展趋势.....	10
1.4.1 无线通信系统的类型.....	10
1.4.2 无线通信的发展趋势.....	16
<b>第 2 章 无线信道的特性</b> .....	18
2.1 无线电波传播.....	18
2.1.1 无线电波的传播方式.....	18
2.1.2 无线电波的四种种效应.....	18
2.1.3 无线电波的信号特点.....	20
2.2 大尺度路径损耗与阴影衰落.....	22
2.2.1 自由空间传播模型.....	22
2.2.2 地面反射模型.....	25
2.2.3 绕射模型.....	28
2.2.4 路径损耗和阴影衰落的混合模型.....	33
2.2.5 经验路径传播模型.....	38
2.3 小尺度多径衰落.....	44
2.3.1 信道的传播模型.....	45
2.3.2 多径信道的参数.....	50
2.3.3 小尺度衰落的类型.....	54
2.3.4 多径衰落信道的统计特性.....	58
习题.....	66
<b>第 3 章 无线通信中的数字调制</b> .....	68
3.1 数字调制概述.....	68
3.2 带通调制信号表示.....	69
3.2.1 时间域表示.....	69
3.2.2 信号空间表示.....	70
3.3 脉冲成形.....	71

3.3.1	奈奎斯特准则	71
3.3.2	升余弦滚降滤波器	74
3.3.3	高斯脉冲成形滤波器	75
3.4	典型数字调制	77
3.4.1	BPSK	78
3.4.2	QPSK	79
3.4.3	偏移四相相移键控	81
3.4.4	$\pi/4$ -差分正交相移键控	83
3.4.5	最小频移键控	88
3.4.6	高斯最小频移键控	90
3.5	功率谱密度	97
3.5.1	BPSK 功率谱密度	99
3.5.2	QPSK 功率谱密度	100
3.5.3	OQPSK 功率谱密度	101
3.5.4	$\pi/4$ -DQPSK 功率谱密度	101
3.5.5	MSK 功率谱密度	101
3.5.6	GMSK 功率谱密度	103
3.6	数字调制的性能	104
3.6.1	AWGN 信道	104
3.6.2	衰落信道	107
	习题	111
<b>第 4 章</b>	<b>正交频分复用技术</b>	<b>112</b>
4.1	多载波调制	112
4.2	OFDM 原理	114
4.2.1	正交调制	114
4.2.2	IDFT/DFT 快速实现	116
4.2.3	ISI 消除与循环前缀	116
4.2.4	OFDM 实现	118
4.3	峰均功率比抑制	120
4.3.1	峰均比定义	120
4.3.2	传输性能影响	121
4.3.3	典型的 PAPR 抑制技术	123
4.4	信道估计	126
4.4.1	导频设计	126
4.4.2	信道估计与插值滤波	128
4.5	同步技术	130
4.5.1	符号定时同步	131
4.5.2	载波频率同步	135

习题	137
<b>第 5 章 扩频通信技术</b>	<b>139</b>
5.1 扩频通信原理	139
5.1.1 扩频通信的理论基础	139
5.1.2 扩频通信系统的构成与分类	140
5.2 直接序列扩频	141
5.2.1 直接序列扩频系统的基本原理	141
5.2.2 扩频序列设计	146
5.2.3 码捕获与跟踪	150
5.3 跳频扩频	154
5.3.1 跳频扩频的基本原理	154
5.3.2 跳频序列设计	160
5.3.3 跳频码同步	162
习题	165
<b>第 6 章 无线通信中的组网技术</b>	<b>166</b>
6.1 无线通信网络	166
6.2 多址接入技术	167
6.2.1 多用户信道	167
6.2.2 无冲突的多址接入	168
6.2.3 随机接入	171
6.3 多信道共用与阻塞率	173
6.4 大区制	175
6.5 小区制(蜂窝系统)	180
6.5.1 区域覆盖	181
6.5.2 区群与频率复用	182
6.5.3 区群的组成与布局	183
6.5.4 小区制中的干扰	185
6.5.5 扩大系统容量的方法	188
6.5.6 蜂窝网基本构成与管理	192
习题	195
<b>第 7 章 无线衰落信道的容量与抗衰落技术</b>	<b>198</b>
7.1 无线衰落信道的容量	198
7.1.1 平坦衰落信道的容量	199
7.1.2 频率选择性衰落信道的容量	203
7.2 分集技术	207
7.2.1 概述	207
7.2.2 接收分集	208

7.2.3 发射分集 .....	212
7.3 均衡技术 .....	215
7.3.1 噪声的增强 .....	215
7.3.2 折叠谱与无 ISI 传输 .....	216
7.3.3 均衡器的类型 .....	218
7.3.4 自适应均衡 .....	225
7.4 衰落信道下的 Rake 接收及交织 .....	226
7.4.1 Rake 接收 .....	226
7.4.2 交织 .....	228
习题 .....	229
<b>第 8 章 典型无线网络 .....</b>	<b>230</b>
8.1 GSM .....	230
8.1.1 GSM 概述 .....	230
8.1.2 网络结构 .....	231
8.1.3 信道设计 .....	235
8.1.4 信号处理 .....	239
8.1.5 GPRS .....	241
8.2 IS-95 .....	242
8.2.1 IS-95 概述 .....	242
8.2.2 物理信道 .....	243
8.2.3 关键技术 .....	248
8.3 LTE .....	250
8.3.1 技术特征 .....	251
8.3.2 LTE 演进路线 .....	251
8.3.3 LTE 传输方案 .....	252
8.3.4 TD-LTE .....	254
8.4 WiMAX 802.16e .....	255
8.4.1 WiMAX 与 3G 技术的区别 .....	255
8.4.2 WiMAX 与 Wi-Fi 技术的区别 .....	256
8.4.3 WiMAX 的技术特点 .....	258
8.4.4 WiMAX 技术的优缺点 .....	261
习题 .....	261
<b>参考文献 .....</b>	<b>262</b>
<b>附录 A Q、ERF、ERFC 函数 .....</b>	<b>264</b>
<b>附录 B Erlang-B 表 .....</b>	<b>265</b>
<b>附录 C Erlang-C 表 .....</b>	<b>269</b>



# 第 1 章 绪 论

人类社会建立在信息交流的基础上，通信是推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。在当今信息化社会中，通信技术已成为生产力中最为活跃的技术因素，渗透到社会生活的方方面面，极大地改变了人类社会的运行模式及人们的日常生活方式。特别是在近 20 年，通信技术和通信产业取得了突飞猛进的发展，其中无线通信技术的发展尤其令人瞩目。21 世纪通信产业发展的趋势之一就是“移动超过固定”。据统计，2013 年我国移动电话用户比 2012 年净增 11 695.8 万户，移动电话用户普及率为 90.8%；而固定电话用户总数则比 2012 年减少了 1116.8 万户，普及率为 19.7%。随着信息技术的快速发展和互联网的进一步普及应用，信息对人类社会的影响将越来越大，“任何时间、任何地点、任何方式”通信的需求也将更加迫切，以移动通信为代表的无线通信仍将是信息产业中最为耀眼的“亮点”，成为推动社会经济发展的强劲动力。

## 1.1 无线通信的定义与发展简史

无线电通信就是利用无线电波在开放的空间传播来传递信息的通信方式。人类最早使用的通信方式就是无线通信，如我国古代为了抵御外敌入侵而建设的烽火狼烟报警系统、用来指挥战斗的金鼓旌旗等，而利用无线电来传送信息(消息)的历史只有 100 多年。由于无线电通信具有迅速、准确、可靠的特点，同时几乎不受时间、地点及距离的限制，所以从诞生后就获得了飞速的发展和广泛的应用。纵观无线电通信的发展历史，主要划分为以下几个阶段。

### 1. 无线电通信诞生前夕(1864~1895 年)

从 1837 年美国莫尔斯发明有线电报以后，有线电通信得到了广泛应用，但在相当长的一段时间里，人们认为电只能沿导线传输，线路架设到哪里，信息就只能传到哪里，这大大限制了信息的传播范围。直到 1864 年，麦克斯韦在英国皇家学院发表了著名论文——《电磁场力学的理论》，在这篇论文中，麦克斯韦严格推导出电磁波方程(麦克斯韦方程)，并得出电磁波的传播速度等于光速(30 万千米/秒)的重要结论，成为人类历史上预言电磁波存在的第一人。1887 年，德国物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在，证明了麦克斯韦预见的正确性。1895 年，意大利的马可尼和俄罗斯的波波夫分别独立研制出了无线电接收机，标志着无线电通信成为可能。1895 年 5 月 7 日，波波夫在彼得堡的俄国物理化学会的物理分会上，宣读了关于“金属屑与电振荡的关系”的论文，并当众展示了他发明的无线电接收机。当他的助手在大厅的另一端接通火花式电波发生器时，波波夫的无线电接收机便响起了铃声；断开电波发生器，铃声立即中止。几十年后，为了纪念波波夫在这一天的划时代创举，当时的苏联政府便把 5 月 7 日定为“无线电发明日”。

### 2. 无线电通信产生阶段(1896~1913 年)

从人们认识到可以利用无线电进行通信，到真正实现实用的无线电通信，意大利人马

可尼功不可没。1896年，马可尼成功地发明了无线电报，并于次年获得专利。1897年，马可尼在英格兰海峡完成了陆地和一艘拖船之间的莫尔斯电码无线通信实验。1899年，他首次实现了英法间的无线电通信。1901年12月12日是具有历史意义的一天，马可尼决定用他的发报系统证明无线电波不受地球表面弯曲的影响，进行了横跨大西洋（从英格兰的康沃尔到加拿大纽芬兰之间）的无线电波传输实验。这项发明的重要性在一次事故中戏剧性地显现出来了——1909年，“共和国”号汽船由于碰撞遭到毁坏而沉入海底，这时无线电信息起了作用，除六人外的其他人员全部得救。同年，马可尼因其发明而获得诺贝尔物理学奖。由于电磁波在空间传输过程中，信号强度将随传输距离的增加急剧减弱，使得无线通信的距离有限，且通信的可靠性较差。1906年，美国青年德福雷斯特发明了具有信号放大功能的真空晶体管，能在不失真情况下放大微弱信号，从而可以把电磁波信号传送到更远的地方，使收音机等多种多样的无线通信设备成为现实，极大地促进了无线通信技术的发展。

### 3. 无线电话音通信诞生及发展阶段(1914~1945年)

话音通信是人类传递信息最方便、最快捷的方式。无线电通信诞生以后，科学家一直努力实现无线电话音通信。早在1906年，美国发明家费辛敦成功地进行了人类历史上第一次不用导线而用电磁波传送语言和音乐的试验，但声音作用于送话器所转换成的音频电信号十分微弱，不能有效地对需要发送出去的高频无线电波进行调制，影响了通话的距离和声音传输的质量。当电子管进入实用阶段后，人们才可以借助电子管对送话器输出的微弱音频电信号进行放大，然后对强高频无线电波进行调制，无线电话才真正具有生命力。1914年，这一努力获得成功，实现了首次无线电话音通信。此时，第一次世界大战爆发，刚刚登上通信舞台的无线电话就应用到作战指挥中，在前线首次出现了应用无线电话——报话机指挥部队的新场面。美国无线电工程师阿姆斯特朗分别于1918年和1935年发明了超外差式接收机和调频无线通信，提高了无线话音传输的质量。1924年，贝尔(Bell)实验室宣布首次实现了双向话音无线移动通信。1928年，美国底特律警察局率先使用装备能适应移动车辆振动影响的单向无线电收发信机——超外差AM接收机，标志着移动话音通信开始应用。

### 4. 无线电通信全面普及、快速发展阶段(1946~1998年)

第二次世界大战加速了制造业及小型化技术的发展，特别是随着1948年晶体管的发明，半导体技术得到迅猛发展，出现了大规模集成电路和超大规模集成电路，并很快与通信技术结合。这些器件的应用使通信设备的功耗和体积不断下降，而功能日益强大，设备和维护费用同时降低，使各种通信设备开始大量普及并广泛应用。在此期间，各种类型的现代无线通信系统开始涌现。20世纪40年代产生了传输频带较宽、性能较稳定的微波通信。1958年，伴随着SCORE通信卫星的升空，成功揭开了卫星通信的序幕。此外，随着对无线数据传输需求的日益增长，产生了无线局域网(Wi-Fi)、蓝牙(Bluetooth)等无线通信系统，无线通信技术呈现出百花齐放、蓬勃发展的局面。其中，蜂窝移动通信无疑是这个阶段无线通信技术发展的最大亮点。1946年，第一个公共移动电话系统在美国的5个城市建立，并首次实现了移动用户和公共电话网(PSTN)的互通。1978年，贝尔实验室成功研制模拟蜂窝移动通信系统(AMPS)。同期，1979年日本的HAMTS、1980年北欧的NMT及1985年英国伦敦的TACS等第一代模拟蜂窝通信系统相继投入实际运行。此后，以1988

年欧洲开发的全球移动通信系统(GSM)及1993年美国开发的IS-95为代表的第二代窄带数字蜂窝通信系统迅速取代了第一代模拟蜂窝系统,并在全球得到了广泛应用。蜂窝移动通信系统使移动通信真正进入个人领域,标志着移动无线通信开始向大众普及。

#### 5. 以新一代移动通信为代表的现代无线通信加速发展阶段(1999年至今)

在互联网技术和通信技术的推动作用下,通信技术和电信产业向着数字化、大容量、网络化与多业务综合的方向发展,传统的电信网和数据网开始走向融合。随着数据通信与多媒体业务需求的发展,适应移动数据、移动计算及移动多媒体运作需求的第三代移动通信(3G)开始兴起。经多次融合努力,国际电信联盟(ITU)在1999年确定了3G标准,包括中国的TD-SCDMA方案在内的5类RTT技术标准共6种方案成为最终结果。在人们期待3G所带来的优质服务的同时,第四代移动通信(4G)系统的研究也在实验室当中悄然进行。在3G还没有完全普及的时候,2013年4G系统已开始实现商用,而在2014年世界移动通信大会上,聚光灯又打在5G上。目前,欧盟、日本、韩国、中国等都已成立5G相关研究组织,成为全球移动通信领域新一轮技术竞争焦点。在蜂窝移动通信系统飞速发展的同时,毫米波通信、大气激光通信、太赫兹通信等新型传输手段,以及无线传感器网络、移动自组织网络、认知协同网络等新型无线通信网络不断涌现,无线通信开始进入全面快速发展的阶段。

回顾无线通信的发展历程,人类需求和技术进步是推动无线通信不断发展的永恒动力。近几年,移动通信和互联网成为当今世界发展最快、市场潜力最大的两大业务。这一前所未有的高速增长现象反映了随着时代与技术的进步,人类对移动性和信息的需求急剧上升,移动通信和互联网相融合构建移动互联网,已成为信息产业一个重要的发展趋势,无线通信产业必将迎来新的飞跃,带动人类真正进入信息化社会和数字化经济生活时代。

## 1.2 无线通信的频段与传播方式

无线通信是通过电磁波传递信息的,而电磁波的一个重要特征就是频率。在马可尼发明无线电报后的几年中,人们普遍认为只有无线电频谱较低的部分适合无线电通信且用途有限。1938年召开的开罗会议上,30MHz以上的频率甚至都划分给了业余业务和实验无线电业务。第二次世界大战的紧急需要,几乎一夜之间就改变了这种观点,1943年美国军队制订了一个频率高达300MHz的划分规划。此后,随着技术的发展及市场需求的日益增长,各个频段无线电频谱资源都得到了广泛的应用,将频谱资源进行划分并有序使用已是必然趋势。

目前,国际频率划分是由ITU无线电行政大会确定的,是国际无线电规则的重要组成部分,表1.1列出了ITU颁布的无线电波频谱分布情况。

表 1.1 ITU 频段划分

频段名称	波段名称	频率范围	波长范围
甚低频	超长波	3~30kHz	100~1000km
低频	长波	30~300kHz	1~10km
中频	中波	0.3~3MHz	100~1000m
高频	短波	3~30MHz	10~100m

续表

频段名称	波段名称	频率范围	波长范围
甚高频	米波	30~300MHz	1~10m
特高频	分米波	0.3~3GHz	0.1~1m
超高频	厘米波	3~30GHz	1~10cm
极高频	毫米波	30~300GHz	1~10mm

按表 1.1 所示的方法对无线电频谱进行划分, 对于某些频段的划分不够细致。因此, 对于常用的频段人们又将其进行了更细致的划分, 并在工程实践中更多采用如表 1.2 所示的频段划分及表示方法。

表 1.2 常用频段划分标准

频段名称	频率范围/GHz	波长范围/cm	频段名称	频率范围/GHz	波长范围/cm
P	0.23~1	30~130	X	8~12.5	2.4~3.75
L	1~2	15~30	Ku	12.5~18	1.67~2.4
S	2~4	7.5~15	K	18~26.5	1.13~1.67
C	4~8	3.75~7.5	Ka	26.5~40	0.75~1.13

由表 1.1 可知, 无线电波的频率分布范围很宽, 从甚低频一直到极高频, 各个频段的无线电波在通信中都有重要的应用。一般来说, 电波频率越高, 其承载信息的潜在能力越强, 其穿透能力和绕射能力越弱。此外, 不同频段的无线电波的传播方式不同, 主要有地波传播、天波传播、散射传播、视距传播 4 种传播方式, 如图 1.1 所示。不同频段的无线电波由于传播方式不同、承载信息的能力不同, 导致其通信应用场合各不相同。

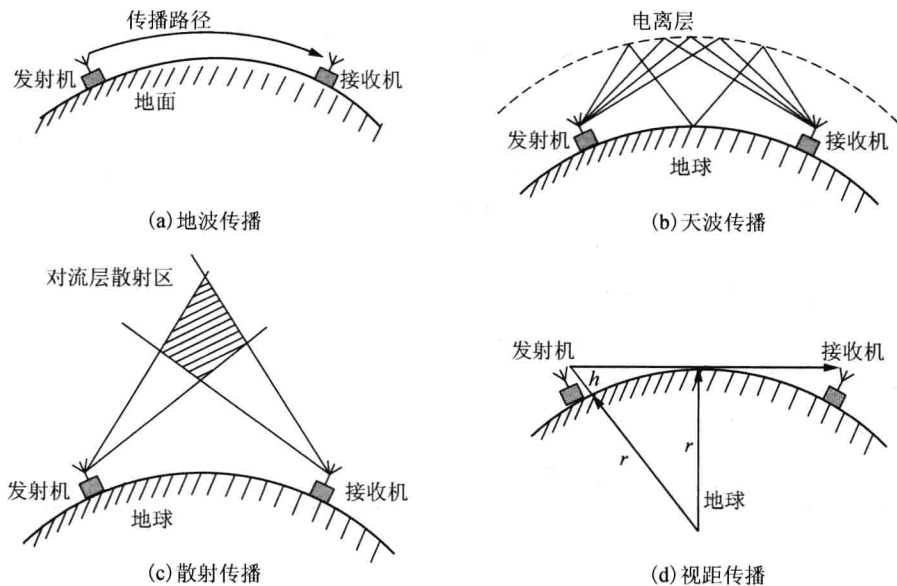


图 1.1 无线电波的主要传播方式

## 1. 地波传播

地波传播是中波以下的较低频段无线电波由于其较强的绕射性能而呈现出的沿地球表面传播的一种方式。地面上有高低不平的山坡和房屋等各种障碍物，根据波的衍射特性，当波长大于或相当于障碍物的尺寸时，波才能明显地绕到障碍物的后面。地面上的障碍物尺寸一般不太大，长波可以很好地绕过它们，中波和中短波也能较好地绕过，短波和微波由于波长过短，绕过障碍物的能力就很差了。此外，由于地球是个良导体，地球表面会因地波的传播引起感应电流，因而地波在传播过程中有能量损失，频率越高损失的能量也越多。所以无论从衍射的角度看还是从能量损失的角度看，长波、中波和中短波沿地球表面可以传播较远的距离，而短波和微波则不能。根据频段和发射功率等条件的不同，地波传播的距离可达数百、上千甚至上万千米。

地波的传播比较稳定，不受昼夜变化的影响，而且能够沿着弯曲的地球表面到达地平线以外的地方，所以中波和中短波用来进行无线电广播、远距离导航等。由于长波和超长波无线电波沿地面传播的距离要远得多，同时有较好的绕射和穿透性能，可用于地下通信和对潜通信。但是长波、超长波无线通信设备比较庞大，造价高，同时信息传递的能力很弱。例如，超长波对潜通信系统可穿透 100m 深的海水，但其信息传送速率仅约为 0.01bit/s。所以长波、超长波一般只用于构建应急通信系统。

## 2. 天波传播

天波传播是短波频段的无线电波利用空中电离层对电波反射的特性而呈现的一种远距离传播方式。电离层是地球大气层上部空气分子由于受太阳紫外线及宇宙射线的辐射而电离，并且电离过程与复合过程达到动态平衡而形成的等离子体，可对短波频段电波产生折射和反射。其他频段的电波要么被电离层吸收，要么穿透出去。电离层分为 D 层、E 层、F1 层和 F2 层等。其中，D 层高度为 60~90km，白天可反射 2~9MHz 的频率。E 层高度为 90~130km，这一层对短波的反射作用较小。F 层对短波的反射作用最大，分为 F1 和 F2 两层。F1 层高度为 130~210km，只在日间起作用，F2 层高度大于 210km，是 F 层的主体，日间夜间都支持短波传播。利用电离层反射，短波天波传播距离可达数百至数千千米。电离层最高可反射 40MHz 的频率，最低可反射 1.5MHz 的频率。根据这一特性，短波工作频段被确定为 1.6~30MHz。

电离层的高度和浓度一方面随地区、季节、时间、太阳黑子活动等自然因素的变化而变化，另一方面也受到核试验及大功率雷达等人为因素影响而变化，这决定了天波传播很不稳定。在天波传播过程中，路径衰耗、时间延迟、大气噪声、多径效应、电离层衰落等因素都会造成信号的弱化和畸变，影响短波通信的效果。此外，实际电离层也不像上面所叙述的那样由规则的、平滑的层组成，而是由块状的、云一般的、不规则的电离的团或者层组成。因此，电离层反射到地面的区域可能是不连续的。

短波通信的缺点是信道不稳定、信息传递能力较弱，但具有发射功率小、作用距离远、设备简单、机动灵活性高等优点。目前，短波通信在授时、导航、通信、广播等方面都有广泛的用途。由于短波通信是唯一不受网络枢纽和有源中继体制约的远程通信手段，在军事通信中的地位非常重要。

### 3. 散射传播

散射传播是微波频段无线电波利用空中介质对电磁波的散射作用，在两地间进行的一种超视距传播方式。对流层、电离层、流星余迹、人造散射物体等都具有散射电磁波的性质，但通常所说的散射通信大多是指对流层散射通信。对流层是大气层中距地面 8~18km 的部分，其中分布着大量直径微小的空气分子湍流，由于大气的湍流运动产生了具有不同介电常数的湍流团，当无线电波照射到这些不均匀的湍流团时，就在每一个不均匀体上感应电流，成为二次辐射体，从而向各个方向散射发出该频率的二次辐射波，实现超视距的无线电通信。由于对流层散射现象在 200~8000MHz 频段比较显著，所以对流层散射通信主要工作在这个频段内。

对流层散射通信的优点：通信距离远，单跳距离一般为 300km，多跳转接可达数千千米；不受核爆炸和太阳耀斑的影响，传输可靠度高，一般可达 99%~99.9%；通频带较宽，可达 10MHz 以上，能实现多路通信，可以传送电话、电报和数据等。散射通信的主要缺点：传输损耗大，且随着通信距离的增加而剧增；散射信号有较深的快衰落，其电平还受散射体内温度、湿度和气压等的影响，且有明显的季节和昼夜的变化。由于散射通信中电磁波传输损耗很大，到达接收端的信号很微弱，为了实现可靠的通信，一般要采用大功率发射机，高灵敏度接收机和高增益、窄波束的天线。为了克服或减小快衰落的影响，常采用分集接收等技术。散射通信由于具有良好的抗干扰、低截获及抗摧毁特性，在军事通信中得到了广泛应用，是建立战略、战役通信无线干线传输链路的重要手段。

### 4. 视距传播

视距传播是指在发射天线和接收天线间能相互“看见”的距离内，电波直接从发射点传播到接收点(地面传播一般还包括地面的反射波)的一种传播方式。任何频段的无线电波都可以实现视距传播。

视距传播的优点是传输容量大、传播稳定，但由于受地球曲率及地表环境的影响，其传输距离较短，一般为 20~50km。视距传播方式要想实现远距离通信，必须人为设置中继通信平台，如卫星、飞机、气球或地面中继站等。

第二次世界大战前，视距传播仅用于超短波以下频率。战时，地面微波中继通信得到发展，战后发展尤为迅速。目前，利用视距传播的微波中继通信和卫星通信系统已遍布世界各地，成为远距离大容量无线通信的主要方式。

不同频段的无线电波除承载信息的能力、传播模式不同外，通信系统的特性也有较大差异。电波频率越高，收发设备的天线波束可以做得越窄，即天线的方向性越强，功率利用率也越高；电波频率越高，在同等尺度条件下天线的收发效率越高，可使通信天线尺寸显著减小，便于设备小型化，非常适合携带和机动使用。因此，在定点通信场合，使用较高频段的高增益定向天线可大大节省功率；在机动性要求较高的场合则正好相反，应使用较低频段的电波进行通信(或者以降低功率利用率为代价，使用宽波束天线或全向天线通信)。

目前，随着无线通信的迅速发展，适合无线通信所用的频谱资源日趋紧张。频谱资源已经成为一种重要的战略资源，必须合理分配，严格管理，才能保证有效利用。无线电频谱管理及高效频谱利用技术已经成为无线通信研究领域的一项重要课题。

## 1.3 无线通信的特点与关键技术

### 1.3.1 无线通信的特点

无线通信与有线通信的基本原理和技术途径具有同一性，但由于无线信道的特殊性，无线通信系统与有线通信系统在关键技术、系统构成等方面也有较大差别。

(1) 无线信道的传输特性相比有线信道更为恶劣。无线电磁波信号在空间传递过程中，不仅能量会随距离的增加而快速衰减，复杂传播环境会造成无线电波能量的衰减更加严重。此外，传播环境中的墙壁、地面、建筑物和其他物体会对无线电波形成反射、散射和绕射，从而导致信号通过多条路径到达接收机，造成多径效应。多径效应会导致信号的衰落，不仅会引起接收信号能量的剧烈起伏，甚至会导致接收信号的波形发生失真，严重影响接收机的性能。如果发射机、接收机或周围的物体发生相对运动，多径反射和衰减的变化将使接收信号经历随机波动和频率偏移，进一步增加了无线通信接收机的复杂度。因此，无线信道的多径效应和时变特性限制了无线信道的传输性能。

(2) 无线通信是在开放的空间通过辐射和接收电磁波进行通信的，一方面受自然界中各种干扰和噪声的影响相比有线通信更为严重；另一方面一定区域范围内的无线通信信号也会相互干扰。为了克服无线通信信号之间的干扰，必须把可用的无线信道分成若干互不干扰的子信道，再分别分给各个用户。无线信道的开发特性增加了无线组网的复杂性，并限制了无线通信系统的容量。

虽然相比有线通信，无线通信在传输质量、传输速率等方面存在着较大不足，但是无线通信具有不受连线束缚、组网迅速灵活等优点，特别是能够提供移动通信，使得无线通信技术始终受到广泛关注，成为研究最为活跃的通信技术领域。无线通信技术的发展历程就是不断寻求新的技术途径，以克服无线传输、组网等方面的不利因素，实现更佳的无线通信性能。

### 1.3.2 无线通信的关键技术

相比有线通信，无线通信存在信道复杂、误码率高及频谱资源受限等问题，使得无线通信领域的技术进步相比有线通信领域更具有挑战性。无线通信的关键技术涉及传输、组网等多个层次。随着无线通信的普及应用，无线频谱资源日趋紧张，无线通信技术已从最初的解决点对点可靠传输，发展到如何通过高效传输、灵活组网以实现频谱的最佳利用，并能在无线传播环境下实现对综合业务的有效支撑。

由于通信网是一个极其复杂的实体，为了减少通信网设计的复杂性，大都采用层次化结构来组织和设计通信网络。目前，大都采用基于计算机网络发展起来的开放系统互连(OSI)参考模型，来描述通信网的相关技术和功能层次。OSI参考模型是为实现开放系统互连，描述网络系统功能和概念，协调网络通信而建立的功能分层模型，由国际标准化组织(ISO)和国际电报电话咨询委员会(CCITT)联合制定。OSI参考模型是一种异构系统互连的分层结构，提供了控制互连系统交互规则的标准骨架，从低到高分别是物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层，如图1.2所示。

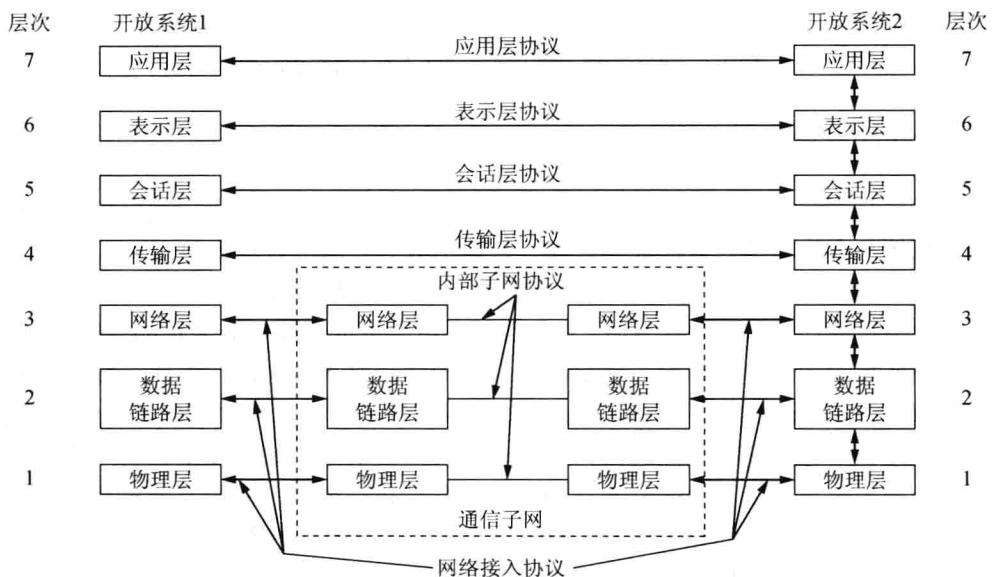


图 1.2 OSI 七层模型

OSI 参考模型只是定义了一种抽象结构，而并非具体实现的描述；不同系统中相同层的实体为同等层实体；同等层实体之间通信由该层的协议管理；相邻层间的接口定义了原语操作和低层向上层提供的服务；每层完成所定义的功能，修改本层的功能并不影响其他层。一般情况下这七层或其子集称为协议栈。两个协议栈中不同层之间唯一的物理连接发生在物理层。在剩余的每一层中，对等层之间都有一个虚拟连接。

传统的通信子网设计主要涉及 OSI 七层模型中的物理层、数据链路层和网络层的功能，无线通信网络中上述各层的功能和关键技术如下。

### 1. 物理层的主要功能及关键技术

物理层的主要功能是利用物理传输介质为数据链路层提供物理连接，以便透明地传送比特流，这一层数据的单位称为比特 (bit)。对于无线通信系统来说，其物理介质就是不同频率的电磁波，物理层的技术就是要克服电波传播过程中的各种不利因素，实现可靠、高效的信息传递。

无线通信中的物理层技术包括调制、编码及天线技术等。考虑到无线传播环境的特殊性，无线通信对调制、编码等有着特殊的要求，如为提高无线通信系统的功率利用率和适应复杂的无线信道所发展的恒包络调制技术；为提高无线通信的可靠性，广泛采用的各种新型纠错编码技术，如 LDPC 码、Turbo 码及将调制和编码联合优化的调制编码 (TCM) 技术等；为了满足多径传播环境下无线高速数据传输的需求，先后发展的直接扩频传输体制、正交频分复用 (OFDM) 技术及多输入多输出 (MIMO) 天线技术等。此外，无线通信系统中还广泛采用了交织、均衡、分集等技术，以应对复杂无线传播环境对通信信号的影响，提高无线传输系统的性能。物理层技术是无线通信的核心技术，是构建各种无线通信系统的基础。



## 2. 数据链路层的主要功能及关键技术

数据链路可以粗略地理解为数据通道。物理层要为终端设备间的数据通信提供传输介质及其连接。介质是长期的，连接是有生存期的。在连接生存期内，收发两端可以进行不等的一次或多次数据通信。每次通信都要经过建立通信联络和拆除通信联络两个过程。这种建立起来的数据收发关系称为数据链路。在物理介质上传输的数据难免受到各种不可靠因素的影响而产生差错，为了弥补物理层上的不足，为上层提供无差错的数据传输，就要对数据进行检错和纠错。数据链路层的数据单位为帧(frame)，数据链路的建立、拆除，对数据的检错、纠错是数据链路层的基本任务。数据链路层包含逻辑链路控制(LLC)子层和介质访问控制(MAC)子层两个子层。其中，无线通信系统 MAC 子层的一个重要的功能是实现物理链路的共享传输，即多址接入技术。对于无线通信系统来说，多址技术对于提高频谱利用率非常关键。

无线通信中的数据链路层技术包括成帧、数据的检错和纠错、多址技术等。其中，数据链路层的纠错功能往往和物理层结合起来实现，如目前发展的自适应编码调制(ACM)技术、混合 ARQ 体制等技术可以更好地适应无线信道特性，在时变的信道环境下提供更可靠的链路层链接。无线通信系统中的多址技术可以分为固定分配多址技术和基于竞争机制的多址技术。一般来说，固定分配方式可以确保各种业务所需的带宽，提供质量较好的服务，广泛用于支持电信业务的各种通信系统网络中。固定分配多址技术除传统的频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)及码分多址(CDMA)外，现在结合多波束天线发展了空分多址(SDMA)技术，以及将上述多址技术组合实现的混合多址技术。基于竞争机制的多址接入技术是采用竞争的方式来共享无线传输信道，系统所支持的用户数目及每个用户所占用的实际可用资源并不是固定的。此时，评价系统性能的指标主要是系统的吞吐率和信息传输的平均时延。典型的基于竞争机制的多址接入技术包括 ALOHA、载波侦听多址接入(CSMA)等方式。相比固定分配方式，基于竞争机制的多址方式一般在提供通信业务的服务质量保障方面存在不足，但其实现及资源分配更为灵活，因此也得到了广泛应用。此外，基于固定分配的多址方式一般也需要采用竞争机制来实现初始的信道接入。

## 3. 网络层的主要功能及关键技术

网络层是在数据链路层提供的两个相邻端点之间的数据帧的传送功能上，进一步管理网络中的数据通信，将数据设法从源端经过若干个中间结点传送到目的端，从而向传输层提供最基本的端到端的数据传送服务。网络层的作用是实现两个端系统之间的数据透明传送，具体功能包括寻址和路由选择、连接的建立、保持和终止等。它提供的服务使传输层不需要了解网络中的数据传送和交换技术。简单地说，网络层的功能就是“路径选择、路由及逻辑寻址”，并具有一定的拥塞控制和流量控制的能力。网络层的数据单位称为数据包(packet)。互联网 TCP/IP 体系中的网络层功能由 IP 规定和实现，故又称 IP 层。无线通信，特别是移动通信系统中的网络层技术相比固定通信系统要复杂得多。目前，各类通信网的体制逐步趋于基于 IP 技术进行融合，现在发展的移动 IP 技术、IPv6 技术成为未来移动通信网络互联的基础。

针对不同的应用环境和通信业务，无线通信网络的拓扑结构、物理层技术、链路层技