

中国通信学会普通高等教育『十二五』规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

无线通信系统 与技术

潘焱 田华 魏安全 编著

Wireless Communication
Systems and Technologies



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



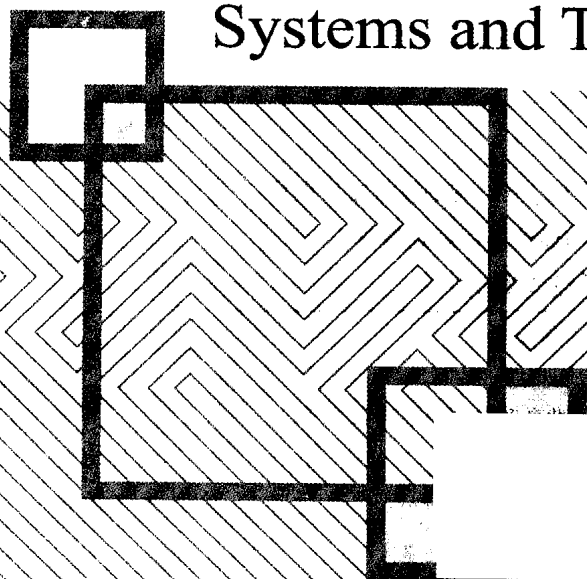
精品系列

中国通信学会普通高等教育『十二五』规划教材立项项目
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

无线通信系统 与技术

潘焱 田华 魏安全 编著

Wireless Communication
Systems and Technologies



人民邮电出版社
北京



精品系列

图书在版编目 (C I P) 数据

无线通信系统与技术 / 潘焱, 田华, 魏安全编著

-- 北京: 人民邮电出版社, 2011.3

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

ISBN 978-7-115-24027-9

I. ①无… II. ①潘… ②田… ③魏… III. ①无线电通信—通信系统—高等学校—教材 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第245925号

内 容 提 要

全书共分10章。第1章至第3章介绍了无线通信的基础知识,包括无线通信所涉及的频谱范围、电波传播特点、调制技术、多址技术、扩频技术和编码技术等,对无线通信系统的基本概念与系统构成也进行了简单的描述。第4章至第10章分别对移动通信系统、微波中继与卫星通信系统、无线局域网(WLAN)技术、全球互联微波接入(WiMAX)技术、无线市话、蓝牙技术等做了较为详细的介绍。

本书可作为普通高等院校通信工程、电子信息科学与技术等专业相关课程的教材,也可供相关技术人员阅读参考。

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

无线通信系统与技术

◆ 编 著 潘 焱 田 华 魏安全

责任编辑 蒋 亮

◆ 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>

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 18.5

2011年3月第1版

字数: 454千字

2011年3月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-24027-9

定价: 36.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

无线通信是利用电磁波信号在空中传播信息的一种通信方式，近些年在信息通信领域中，发展最快、应用最广的就是无线通信技术。无线通信技术在宽带无线接入领域、移动通信领域、卫星遥控遥测领域都有着广泛的应用。

无线通信技术的发展迅速，近些年来，各种新的调制与编码技术的应用不断出现，移动通信与宽带无线接入通信的快速发展甚至在某种程度上改变了人们的生活习惯，几乎所有的人都成为某种或数种无线技术的用户或受益者。

本书深入浅出地讲解了无线通信的基本概念，天线与电波传播知识，调制编码技术等，在此基础上介绍了几种常用的无线通信系统和技术，重点对系统构成与关键技术进行了详细描述。

本书的使用对象为通信工程和电子信息类相关专业的本科、专科生，也可以作为无线通信工程技术人员的参考书。每个章节后有小结和大量的习题，方便读者自学。

全书共分10章。第1章介绍了无线通信的概念、定义以及发展简史，对无线通信所涉及的频谱范围和电波传播的特点进行了描述；第2章重点介绍了无线通信中的一些基本技术，包括调制技术、多址技术、扩频技术和编码技术等；第3章介绍了无线通信系统的基本概念与系统构成；第4章介绍了移动通信系统的知识，重点对GSM及CDMA这两种数字蜂窝移动系统的网络结构、系统特点、无线空中接口、技术演进进行了详细介绍；第5章介绍了微波中继与卫星通信系统；第6章和第7章分别介绍了无线局域网（WLAN）技术和全球互联微波接入（WiMAX）技术；第8章介绍了几种主要的区域性无线接入标准；第9章和第10章分别介绍了无线市话和蓝牙技术。

本书由潘焱主编，参加编写工作的还有田华和魏安全。潘焱编写了第1章至第3章、第5章至第7章、第9章，田华编写了第4章，魏安全编写了第8章、第10章。

编写工作得到解放军理工大学通信工程学院有关领导、同事和相关部门的大力支持，在此编者表示衷心的感谢。

由于编写时间限制及作者水平有限，书中存在错漏或者不妥之处在所难免，望广大读者批评指正。

目 录

第1章 无线通信概述1	第4章 移动通信系统57
1.1 无线通信发展历史.....1	4.1 移动通信概述.....57
1.2 无线通信应用.....2	4.1.1 移动通信的特点.....57
1.3 无线频谱划分.....4	4.1.2 移动通信的发展.....58
1.4 无线信道与电波传播特性.....5	4.1.3 移动通信新技术.....63
1.4.1 自由空间传播.....5	4.2 GSM 数字蜂窝移动通信系统.....70
1.4.2 地面传播.....7	4.2.1 系统组成.....70
1.4.3 卫星传播.....8	4.2.2 无线空中接口.....73
1.5 无线通信发展趋势.....9	4.2.3 GPRS.....78
1.6 本章小结.....12	4.2.4 EDGE.....81
练习题.....12	4.3 CDMA 数字蜂窝移动通信系统.....83
第2章 无线通信技术15	4.3.1 CDMA 蜂窝移动通信技术的 演进与标准.....84
2.1 调制技术.....15	4.3.2 系统结构与特点.....85
2.1.1 模拟调制技术.....16	4.3.3 无线空中接口.....89
2.1.2 数字调制技术.....20	4.3.4 cdma2000 1x.....90
2.2 多址技术.....25	4.4 第三代移动通信系统.....93
2.3 扩展频谱技术.....28	4.4.1 第三代移动通信系统概述.....93
2.3.1 直接序列扩频技术.....29	4.4.2 WCDMA.....97
2.3.2 跳频技术.....31	4.4.3 cdma2000.....100
2.4 编码技术.....32	4.4.4 TD-SCDMA.....102
2.4.1 信源编码.....32	4.4.5 第三代移动通信系统的 进一步演进.....104
2.4.2 信道编码.....36	4.5 本章小结.....109
2.5 本章小结.....40	练习题.....109
练习题.....40	第5章 微波与卫星通信系统114
第3章 无线通信系统基本知识44	5.1 微波中继通信.....114
3.1 无线通信系统结构.....44	5.1.1 数字微波中继通信系统组成.....116
3.2 天线基础知识.....46	5.1.2 微波传播特性.....117
3.2.1 概述.....46	5.1.3 分集接收.....121
3.2.2 天线阵列.....50	5.1.4 微波线路设计.....122
3.3 发射系统组成.....52	5.2 卫星通信系统.....124
3.4 接收系统组成.....53	5.2.1 卫星通信系统的组成.....127
3.5 本章小结.....54	5.2.2 卫星通信的多址联接方式.....132
练习题.....55	

5.2.3 甚小天线地球站	134	8.2.1 概述	205
5.2.4 卫星移动通信系统	137	8.2.2 网络结构	206
5.3 本章小结	142	8.2.3 关键技术	207
练习题	143	8.2.4 性能特点	209
第6章 WLAN 技术	147	8.2.5 应用	211
6.1 WLAN 概述	147	8.3 WiBro 无线接入技术	213
6.2 IEEE 802.11 MAC 层	149	8.3.1 概述	213
6.2.1 接入控制机制	149	8.3.2 网络结构	213
6.2.2 IEEE 802.11 的 MAC 帧格式	152	8.3.3 关键技术	214
6.3 IEEE 802.11 的物理层	155	8.3.4 性能特点	216
6.4 WLAN 技术发展	163	8.3.5 应用	216
6.5 本章小结	164	8.4 HiperLAN/2 无线接入技术	216
练习题	165	8.4.1 概述	216
第7章 WiMAX 技术	167	8.4.2 网络结构	217
7.1 WiMAX 概述	167	8.4.3 关键技术	218
7.2 WiMAX 协议结构	169	8.4.4 性能特点	219
7.2.1 参考模型	169	8.4.5 应用	220
7.2.2 物理层	170	8.5 本章小结	221
7.2.3 MAC 层	171	练习题	221
7.3 IEEE 802.16 MAC 层	173	第9章 无线市话系统	224
7.3.1 MAC 层格式	175	9.1 概述	224
7.3.2 MAC 层控制协议	179	9.2 关键技术	225
7.4 IEEE 802.16 物理层	184	9.2.1 PAS 的频率使用与多址技术	225
7.4.1 单载波调制	185	9.2.2 微蜂窝与信道动态分配技术	228
7.4.2 单载波接入	189	9.2.3 V5 技术	229
7.4.3 正交频分复用	191	9.3 系统组成	235
7.4.4 正交频分复用接入	193	9.4 空中接口及通信流程	236
7.5 WiMAX 技术发展	195	9.4.1 PHS 空中接口的物理结构	236
7.6 本章小结	196	9.4.2 PHS 的逻辑信道	238
练习题	197	9.4.3 超帧结构	239
第8章 无线接入相关技术	200	9.4.4 链路层与网络层结构	240
8.1 SCDMA 无线接入技术	200	9.4.5 PAS 切换与漫游技术	242
8.1.1 概述	200	9.5 信令传输	245
8.1.2 网络结构	201	9.6 本章小结	247
8.1.3 关键技术	203	练习题	247
8.1.4 性能特点	205	第10章 蓝牙技术	251
8.1.5 应用	205	10.1 概述	251
8.2 McWiLL 无线接入技术	205	10.1.1 蓝牙技术的起源与演进	251
		10.1.2 蓝牙技术的特点	252

10.2 蓝牙设备组成与蓝牙网络结构···	253	10.6 蓝牙链路管理规范·····	270
10.2.1 蓝牙设备的组成·····	253	10.7 蓝牙逻辑链路控制和自适应	
10.2.2 蓝牙网络结构·····	255	协议规范·····	270
10.3 蓝牙协议·····	256	10.7.1 L2CAP 信道·····	270
10.3.1 蓝牙标准文档构成·····	257	10.7.2 L2CAP 分组·····	271
10.3.2 蓝牙协议体系结构·····	257	10.7.3 信令命令·····	271
10.3.3 蓝牙应用模型·····	259	10.7.4 服务质量·····	272
10.4 蓝牙无线电规范·····	260	10.8 蓝牙系统的实现·····	273
10.5 蓝牙基带规范·····	261	10.8.1 蓝牙模块·····	273
10.5.1 物理信道·····	261	10.8.2 蓝牙系统的实现方式·····	275
10.5.2 时钟与编址·····	262	10.8.3 蓝牙产品的开发步骤·····	276
10.5.3 物理链路·····	264	10.9 蓝牙技术的应用·····	276
10.5.4 逻辑信道·····	265	10.10 本章小结·····	277
10.5.5 分组·····	265	练习题·····	277
10.5.6 差错控制·····	267	附录 缩略语·····	281
10.5.7 链接控制·····	268	参考文献·····	288

无线通信是无线电通信的简称，是电子学的最早应用之一，也是电子学的最新应用之一。无线通信是指利用无线电波传播信息的通信方式，无线电波是指在自由空间（包括空气和真空）传播的电磁波。无线通信可用来传输电报、电话、传真、图像、数据和广播电视等通信业务。与有线通信相比，不需要架设传输线路，不受通信距离限制，机动性能好，建立迅速。

无线通信按所使用频率波段可分为长波通信、中波通信、短波通信、超短波通信和微波通信等。

1.1 无线通信发展历史

人类社会使用电通信始于 19 世纪。1837 年，美国人摩尔斯（Morse）发明了有线电报，1876 年，美国人贝尔（Bell）发明了有线电话，开始了语音信号的有线传输。

无线通信的出现比有线通信稍晚一些。1865 年，英国人麦克斯韦（Maxwell）成功预测了电磁波的存在，他在递交给英国皇家学会的论文《电磁场的动力理论》中阐明了电磁波传播的理论基础。

德国人赫兹（Hertz）在 1886 年至 1888 年间，首先通过试验验证了麦克斯韦的理论。

英国人马可尼（Marconi）在 1899 年和 1901 年分别实现了横跨英吉利海峡和大西洋的通信，这些试验的成功使无线电广泛应用于船只之间以及船只和海岸之间的通信。马可尼拥有了通常被认为是世界上第一个无线电技术的专利，“电脉冲及信号传输技术的改进以及所需设备”。1909 年，马可尼和布劳恩（Braun）由于“发明无线电报的贡献”获得诺贝尔物理学奖。

早期的无线通信系统使用的是原始的但功率很强的火花间歇放电发射器，它仅适用于无线电报。美国人德福雷斯特（DoForest）在 1906 年发明了真空三极管，从而可以对连续波信号进行调制，并可用于语音传输。

利用无线电成功传输语音的工作则由费森登（Fessenden）完成，1906 年圣诞前夜，他在美国马萨诸塞州采用外差法实现了历史上首次无线电广播，费森登广播了用小提琴演奏的“平安夜”乐曲和《圣经》片段的朗诵声音。

早期的无线发射器过于笨重，不便于安装在运输工具上。20 世纪 20 年代，底特律警察局使用的第一个移动无线系统是单工的，在警车中只有接收器而没有发射设备。双工的警用无线电出现于 20 世纪 30 年代中叶，当时它的设备几乎装满了一辆卡车。早期的无线通

信采用的是幅度调制 (AM) 技术, 20 世纪 30 年代后期, 出现了性能更好的频率调制 (FM) 技术。

第二次世界大战促进了移动式和便携式无线系统的发展, 其中包括可以在战场上携带的双工系统, 可以说是今天的蜂窝电话的雏形。

美国电报电话公司 (AT&T) 在 1946 年建设了改进型移动电话服务 (IMTS) 系统, 可以将移动用户自动接入公众业务电话网络 (PSTN)。因为它的容量有限, 所以提供的服务比较昂贵, 但这的确是真正意义上的移动电话服务。

1947 年, 贝尔实验室的三位科学家发明了晶体管。晶体管具有体积小、重量轻、耗电低并且寿命长的优点, 使通信设备小型化、便携化成为可能, 进一步推动了无线通信的发展。

寻呼机出现于 1962 年, 最初的寻呼机只能通知用户去找个电话并拨打它提供的电话号码。随着技术的进步, 越来越多型号的寻呼机不仅能够传递字母和数字信息, 还能够显示文字信息。由于成本低、体积小, 所以尽管寻呼机功能相当有限, 但仍然得到了广泛地使用。

世界上第一个蜂窝无线服务系统于 1979 年在日本投入使用, 然后是 1983 年的北美服务系统。蜂窝电话系统的每个发射器的功率都相当小, 覆盖范围也小, 被称为“蜂窝”。蜂窝系统中频率可以在小范围内得到重复使用, 当然用户也可以在不同的蜂窝小区中漫游, 只要蜂窝足够小, 蜂窝系统就可以容纳足够多的用户。

最初的蜂窝电话系统使用的是模拟调频发射方式, 现在能够提供更高保密性和带宽效率的数字调制方案逐渐在所有的系统中投入使用。当前的蜂窝电话系统在语音传输方面做了优化, 同时也能传输高速数据。

1982 年, 欧洲成立了 GSM (移动通信特别组), 任务是制订泛欧移动通信漫游的标准。

1988 年 10 月, 美国高通公司第一次向公众介绍了 CDMA 蜂窝移动通信概念。

1.2 无线通信应用

无线通信最早应用于航海中, 使用摩尔斯电报在船只与陆地间传递信息。现在, 无线通信有着多种应用形式, 包括无线数据网、移动通信以及无线电广播等。

1. 无线电广播

声音广播的最早形式是航海无线电报。它采用开关控制连续波的发射与否, 在接收机产生断续的声音信号, 即摩尔斯电码。

调幅广播可以用来传播音乐和语音。调幅广播采用幅度调制技术, 信号容易受到诸如闪电或其他干扰源的干扰。

航海和航空中使用的语音电台采用甚高频段的调幅技术, 这使得飞机和船舶上可以使用轻型天线。

调频广播可以比调幅广播具有更高的保真度。调频广播工作于甚高频段 (VHF)。频段越高, 其所拥有的频率带宽也越大, 因而可以容纳更多的电台。

由于调频广播的边带较宽, 在传送音乐和语音的同时还可以用来传播数字信号, 如: 电台标识、节目名称简介、网址、股市信息等。当调频收音机移动至一个新的地区后, 可以根据边带信息寻找当地的调频广播频道。

政府、消防、警察和商业使用的专用电台通常在专用频段上采用窄带调频技术，这些应用通常使用 5kHz 的带宽。相对于调频广播或电视伴音的 16kHz 带宽，保真度上不得不作出牺牲。

短波频段的民用或军用语音通信通常用于船舶、飞机或孤立地点间的通信。大多数情况下，都采用单边带（SSB）调制技术，可以节省带宽，并且可以更有效地利用发射功率。

陆地集群无线电（TETRA）是一种为军队、警察、急救及交通等特殊部门设计的数字集群电话系统，采用集群调度通信的方式，可以更有效地利用有限的频率资源。

2. 电视

通常的模拟电视信号采用将图像调幅、伴音调频合并成在同一信号中传播。

数字电视采用 MPEG-2 图像压缩技术，由此大约仅需模拟电视信号一半的带宽。

3. 移动通信

蜂窝电话或移动电话是当前最普遍应用的无线通信方式。蜂窝电话覆盖区通常分为多个小区。每个小区由一个基站发射机覆盖。理论上，小区的形状为蜂窝状六边形，这也是蜂窝电话名称的来源。运营商已经开始提供第三代移动通信系统（3G）服务，其主导标准为基于码分多址（CDMA）技术的各类标准。

卫星电话系统存在两类形式：一类是基于地球同步卫星的电话系统，例如国际海事卫星（Inmarsat）系统，使用地球同步卫星，用户端采用定向的高增益天线通过卫星接入公众业务电话网络。另一类是基于低轨道卫星系统的电话系统，例如铱（Iridium）系统、全球星（Global Star）系统，直接使用手机天线可以进行双向通信。这两类系统都能够提供全球覆盖服务。

4. 数据传输

数字微波、卫星等通信通常采用正交幅度调制（QAM）。QAM 调制方式是同时利用信号的幅度和相位加载信息。这样，可以在同样的带宽上传递更大的数据量。

IEEE 802.11 是当前无线局域网（WLAN）的标准。它采用 2GHz 或 5GHz 频段，数据传输速率为 11Mbit/s 或 54Mbit/s。

蓝牙（Bluetooth）是一种短距离无线通信的技术。

全球微波互联接入（WiMAX），是一项高速无线数据网络标准，能提供许多种应用服务，包括最后一千米无线宽带接入、热点（hotspot）、小区回程线路以及作为商业用途在企业间的高速连接，在概念上类似 WLAN，但 WiMAX 改善了性能，并允许更大的传送距离。

5. 紧急服务

无线电紧急定位信标（EPIRBs）是用来在紧急情况下对人员、车辆、船舶等通过卫星进行定位的小型无线电发射机。它的作用是为救援人员提供目标的精确位置，以便提供及时的救援。

6. 辨识

利用主动和被动无线电装置，可以辨识以及表明物体身份。

7. 其他

业余无线电是无线电爱好者参与的无线电台通信，受到广大无线电爱好者的喜爱，在全世界总共大约有三百万人以上。业余无线电台可以使用整个频谱上很多开放的频带，爱好者使用不同的编码方式和技术。有些后来商用的技术，比如调频、单边带调幅、数字分组无线电和卫星信号转发器，都是由业余爱好者首先应用的。

无线电还广泛应用于导航、雷达和天文学等其他领域。

1.3 无线频谱划分

无线电波是一种电磁辐射，当前用于无线通信的频率范围已经从3kHz扩展到约100GHz。无线通信频谱划分见表1-1。

表 1-1 各种频率范围及其对应的波长范围

波段名称		频率	波长	频段名称
超长波		3~30kHz	10~100km	甚低频 (VLF)
长波		30~300kHz	1~10km	低频 (LF)
中波		300~3000kHz	100~1000m	中频 (MF)
短波		3~30MHz	10~100m	高频 (HF)
超短波	米波	30~300MHz	1~10m	甚高频 (VHF)
	分米波	300~3000MHz	10~100cm	特高频 (UHF)
微波	厘米波	3~30GHz	1~10cm	超高频 (SHF)
	毫米波	30~300GHz	1~10mm	极高频 (EHF)

频率与波长之间的转换相当容易。对于任何波来说，其频率和波长的关系式如下：

$$v = f\lambda \quad (1-1)$$

式中， v 为电波的传播速度，单位为米每秒 (m/s)； f 为电波的频率，单位为赫兹 (Hz)； λ 为波长，单位为米 (m)，在自由空间（空气一般可近似于自由空间）中传播的无线电波的速度等于光速： 3×10^8 m/s。表示这个量的常用符号是 c 。公式 (1-1) 也可以写成：

$$c = f\lambda \quad (1-2)$$

几乎任何通信系统中所使用的载波都是正弦波。正弦波由于只有一个频率，因此它的带宽为 0。但是，只要对信号进行了调制，其带宽就会增加，噪声对信号的影响随着带宽的增加而增加。在大多数通信系统中，都要尽可能地限制通信带宽。

无线系统的频谱空间总是供不应求，即使严格限制了各种通信业务的带宽，仍然满足不了越来越多的通信需求。为了充分地应用带宽，可以采用频谱复用的方法，即在一个区域中使用的频谱，可以同时另一个区域中再次使用，条件是这两个区域之间相距足够远，相互之间不影响正常的通信。相距的距离取决于许多因素，如发射器功率、天线增益和高度、所使用的调制类型等。

在采用码分多址 (CDMA) 技术的数字移动通信系统中，还采用了功率自适应技术，在保证可靠通信的同时，可以自动地将发射功率降到最低，从而能够使频率在很小距离的范围

内得到重复利用，采用这种方案能够更有效地使用频谱资源。

1.4 无线信道与电波传播特性

无线电波以“横向电磁波”的形式在空间中传播。也就是说电场、磁场和无线电波的传播方向都是相互垂直的。如图 1-1 所示，电场方向为 x 轴方向，磁场方向为 y 轴方向，电波传播方向为 z 轴方向。

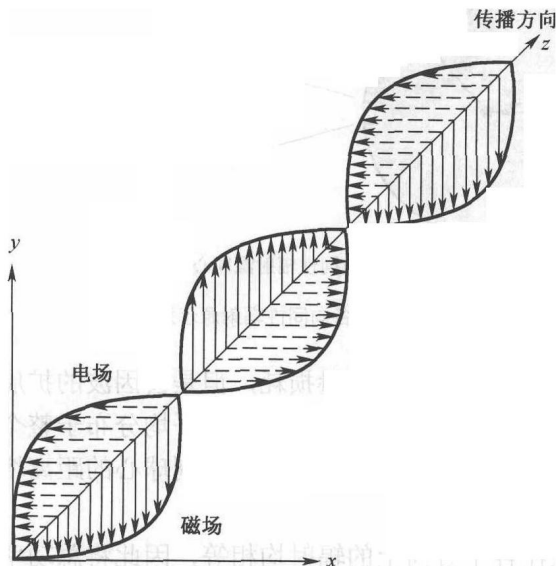


图 1-1 横向电磁波示意图

无线电波的极化方向也是一个重要的概念，指的是电场矢量的方向。极化可以是水平的，也可以是垂直的，而且如果电场矢量在空间中是旋转传播的，则极化可以是圆形的或者椭圆形的。

无线电波是由导体中或由若干导体组成的天线中的电子流动而产生的。无线电波一旦被发射出去，就能够在自由空间或其他传播介质中进行传播。

无线电波在自由空间中的传播速度与光速一样，都是大约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。在其他传播介质中的传播速度要低一些。无线电波在介质中的传播速度由下述公式求出：

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-3)$$

式中， v_p 为无线电波在介质中的传播速度； c 为光在自由空间中的传播速度； ϵ_r 为介质的相对介电常数，真空的相对介电常数为 1，空气的相对介电常数近似为 1，而水的相对介电常数则为 81 左右。

与光的传播一样，无线电波在从一种媒介进入另一种具有不同传播速度的介质时，也会发生折射。

1.4.1 自由空间传播

最简单的电磁波源是空间中的点波源。电磁波从这个点波源向四面八方同等程度的辐射，

它的“波前”（即所有的辐射波在其中都有相同相位的一个表面）是一个球面。这样的波源叫作各向同性辐射器，如图 1-2 所示。当然，在实际中，点波源是不存在的，但是在距离辐射源很远的距离，可以将辐射源近似看作点波源。

我们研究图 1-2 所示的球形表面的一小块区域。当该区域到球心的距离足够大时，该区域可近似看作是一个平面，因此在自由空间中传播的电磁波通常假设为平面波，对它的处理通常比对球面波的处理要更简单一些。

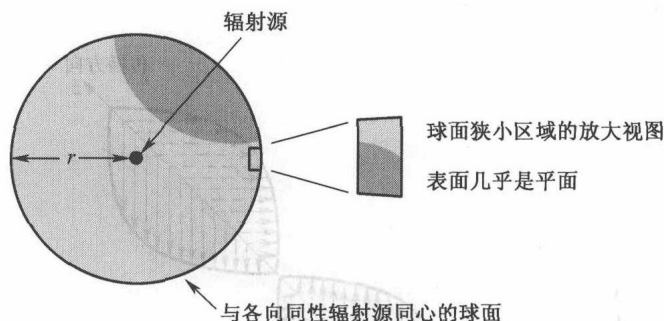


图 1-2 各向同性辐射源示意图

无线电波在自由空间传播时不存在能量损耗，但是会因波的扩展而产生衰减。一个辐射源在向外传播的过程中，来自辐射源的所有能量都将平均分布于整个球体的表面。由于自由空间不吸收任何能量，因此没有能量损失。随着球面到球心的距离增加，辐射源的能量将扩展到很大的球面上。

由于各向同性辐射源在各个方向上的辐射均相等，因此将总功率除以球体的表面积，即可得到辐射功率密度，也就是单位面积上的辐射功率。数学计算公式为：

$$P_D = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \quad (1-4)$$

式中， P_D 为功率密度，单位为瓦特每平方米 (W/m^2)； P_t 为发射功率，单位为瓦特 (W)； G_t 为发射天线增益； r 为接收点到发射天线的距离，单位为米 (m)。

这种“平方律”衰减规律同样适用于光和声音的辐射，更广泛地，这一规律适用于任何形式的辐射。这种衰减不是因介质中的能量损耗造成的，而是由于无线电波从点波源向四周传播而导致的能量扩散。

天线是无源器件，它没有实际的功率增益。它在一定方向上具有更大的功率密度是以其他方向上辐射量减少为代价的。通常增益和衰减用分贝 (dB) 表示，发射机与接收机之间的距离可用千米 (km) 或米 (m) 来表示，信号的频率以兆赫兹 (MHz) 为单位。得到如下公式：

$$P_r = P_t + G_t + G_r - (32.44 + 20\lg d + 20\lg f) \quad (1-5)$$

式中， P_r 为接收功率，单位为分贝毫瓦 (dBm)； P_t 为发射功率，单位为分贝毫瓦 (dBm)； G_t 为发射天线增益 (dBi)，天线增益是一个相对值，用 dBi 表示相对于全向天线的增益； G_r 为接收天线增益 (dBi)， d 为发射机与接收机之间的距离 (km)， f 为频率 (MHz)。

自由空间中的衰减（通常叫做路径损耗）不依赖于天线的增益大小。通过提取公式 (1-5) 中的损耗部分可以很容易地获得自由空间衰减，因此可以将公式 (1-5) 分成两个部分，即：

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p \quad (1-6)$$

$$L_p = 32.44 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (1-7)$$

式中, L_p 为自由空间损耗。

1.4.2 地面传播

自由空间模型对于无线电波在地球表面上的传播具有一定的适用性。频率低于 27GHz 时, 空气的介电常数接近于 1。自由空间传播与地面传播的最明显区别是, 后者传播的范围常常受到地平面的限制。

在低频 (LF) 或中频 (MF) 频段 (最高可达 3MHz) 时, 无线电波能够沿着地球表面弯曲地进行传播, 这种现象称为“地波传播”, 而在高频 (HF) 范围 (大约 3~30MHz) 内, 无线电波将被大气中的电离层反射到地球, 这种现象称为“天波传播”。地波传播和天波传播都能使信号传输的距离比视距传播的范围更大, 但是当频率高于 30MHz 时, 电波传播的主要形式是视距传播。

视距传播的实际通信距离受到地球表面曲率的限制。由于气压、温度和湿度随着距地球高度的增加而减小, 空气的介电常数也会随着高度的增加而减小, 大气的折射会使无线电波稍微弯向地球, 因此视距传播的最大距离通常要稍大于人眼所能看到的距离。传播的实际效果会随着天气条件的变化而变化, 但是一般无线通信的视距传播距离要比可视的视距长 1/3。

发射天线和接收天线两者相对于地球表面的平均高度直接影响视距通信的最大传播距离。图 1-3 示出了天线高度的增加对于最大传播距离的影响。

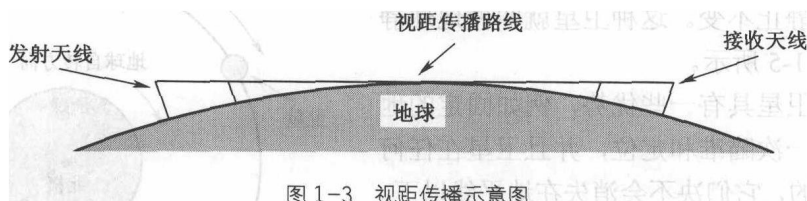


图 1-3 视距传播示意图

在位于一定高度处的发射机与接收机之间的最大距离的近似值由如下公式给出:

$$d = \sqrt{17h_t} + \sqrt{17h_r} \quad (1-8)$$

式中, d 表示最大距离 (km); h_t 为发射天线的高度 (m); h_r 为接收天线的高度 (m)。

公式 (1-8) 计算出的是受制于地球曲率影响的最大通信距离, 实际通信中只有在接收信号足够强的情况下, 才能达到最大通信距离。因此要获得最大通信距离, 还需要结合使用大功率发射机和高增益天线。

在有些情况下, 并不需要获得最大通信距离。例如在蜂窝系统中, 通常需要限制有效通信距离, 从而更好地利用频率资源。

视距传播过程中, 除了发射机到接收机的直射路径, 也会有反射路径。最简单的情况是来自地面的反射, 如图 1-4 所示。如果是粗糙地面, 则反射信号被散射出去, 信号强度很低。如果反射表面比较平滑 (比如水体表面), 则到达接收机的反射信号在强度上能够与入射波的强度相比拟, 这两个信号将会相互影响, 通常称之为干扰。干扰对信号的影响取决于不同路径信号之间的相互关系: 如果两个信号同相, 则会相互叠加, 最终结果是信号幅度得到增强;

而如果两个信号的相位相差 180° ，则会有相互抵消，最终结果是信号幅度受到衰减。信号之间的相位关系取决于直接信号传输与反射信号传输之间的路径长度之差（用波长来表示）。另外，通常在反射点处有 180° 的相移。



图 1-4 地面反射示意图

如果发射机与接收机的位置固定，则需要仔细考察通信路线，通过调整发射机和接收机的天线高度使任何反射都发生在林地或粗糙地面上，从而使反射的影响降到最低。如果路径的大部分位于诸如沙漠或水面等反射平面上时，则需要采用其他技术来减小反射的影响，例如频率分集或空间分集的方法等。

1.4.3 卫星传播

卫星作为通信中继器广泛应用于广播电视及干线数据通信中。

许多通信卫星都使用地球同步轨道：也就是说，这些卫星占有地球赤道上空的圆形轨道，距离地面的高度为 35784km。处于这个高度的地球轨道周期等于地球自转一周所需的时间，大约是 24 个小时。如果卫星运动的方向与地球自转的方向一致，则卫星就会保持在地球表面上空的某一点几乎静止不变。这种卫星就叫做地球静止卫星，如图 1-5 所示。

地球静止卫星具有一些优势，例如固定的地球站天线可以一次瞄准和定位，并且卫星在任何时候都是可用的，它们决不会消失在地平线以下。

不过，对于移动通信来说，地球静止卫星也有许多缺点。它们到地球的距离太远，其路径长度会造成大约 0.25s 的回程时差，对通话的效果影响较大。另外需要高的发射功率与高增益的天线，但是对于使用电池的手持式电话来说，要达到这个要求是不可能的。因此使用地球静止卫星的移动通信系统，通常用户终端都是便携式的，并且通信业务以满足数据业务为主。大多数卫星移动通信系统都是在较低的轨道上使用卫星群，在这种情况下，信号强度也高些，而且传播时间也短些，用户可以使用手持机，并且以语音业务为主。

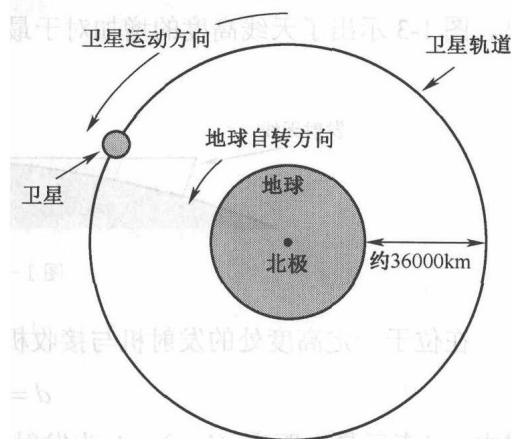


图 1-5 地球静止卫星信道示意图

卫星可以根据相对地球表面的高度进行分类。低轨（LEO）卫星的轨道高度在 1500km 以下，而中轨（MEO）卫星系统的高度在 10000~15000km。由于低轨卫星比其他高度的卫星更接近于地球，因此它的信号相对较强，传播时间相对较短。不过，低轨卫星处于地平线以上的时间却不长，因此需要多个卫星以便进行连续覆盖。中轨卫星实际上是低轨卫星和地球静止卫星之间的折衷产物。

1.5 无线通信发展趋势

当前,移动宽带化和宽带移动化的趋势已经愈加明显。同时无线通信领域的技术发展速度加快,技术竞争加剧,未来的无线通信将呈现网络融合、多种接入技术综合应用、新业务不断推出的发展趋势。

1. 全球第三代移动通信(3G)商用进程加快

提到未来无线技术的展望,就不能不提3G。3G在全球商用已经全面展开,主流技术有3种,包括WCDMA、cdma2000和TD-SCDMA。cdma2000由美国高通公司提出,技术成熟性最高,有着明确的提高频谱利用率的演进路线,但全球漫游能力一般。WCDMA由欧洲和日本支持,有较高的扩频增益,发展空间较大,全球漫游能力最强。2006年以来全球3G用户快速增长。截至2008年9月,全球WCDMA用户数已经突破2.9亿,有91个国家部署了211张WCDMA商用网络。中国联通公司于2009年5月17日开始试商用WCDMA服务,10月1日正式商用WCDMA网络。截至2009年年末,全球已经有109个国家和地区的311家电信运营商部署了cdma2000网络,cdma2000用户已突破5.2亿。2009年起,中国电信开始运营cdma2000网络,截至2010年第1季度,移动用户数达到6545万户,其中3G用户数达到577万户。

TD-SCDMA作为中国提出的3G标准,自1999年正式向国际电联(ITU)提交以来,已经历经十来年的时间,完成了标准的专家组评估、ITU认可并发布、与3GPP体系的融合、新技术特性的引入等一系列的国际标准化工作,从而使TD-SCDMA标准成为第一个由中国提出的,以我国知识产权为主的,被国际上广泛接受和认可的无线通信国际标准。这是我国电信史上重要的里程碑。

TD-SCDMA技术试验情况一直是业界关注的焦点。2002年2月到2004年9月,是TD-SCDMA技术试验阶段,这个阶段实现了TD-SCDMA的“从无到有”。从2004年11月至2005年9月是研发与产业化技术试验。这个阶段解决了“建立产业链”的问题,形成了多厂家环境,建立了较为完整的产业链,实现了基本功能和业务,初步验证了关键技术和组网能力。2005年10月至2006年2月,是应用技术试验。这个阶段的目标是“加快芯片、终端研发”,重点测试芯片和终端,完善设备功能与性能,进一步解决关键技术和完善网络性能。从2006年2月到2007年,是规模网络应用技术试验。这一阶段的任务是“全面验证与完善”。从2007年到2008年,是扩大规模网络应用技术试验。这一阶段的任务是继续扩大商用试验范围。

2008年1月,中国移动在中国北京、上海、天津、沈阳、广州、深圳、厦门、秦皇岛市建成了TD-SCDMA试验网。2008年4月1日,中国移动在中国北京、上海、天津、沈阳、青岛、广州、深圳、厦门、秦皇岛和保定等10个城市启动TD-SCDMA社会化业务测试和试商用。截至2008年年末,在中国使用TD-SCDMA网络的3G手机用户已达到41.9万人。但是TD-SCDMA手机放号首日即出现诸多问题,如网络建设尚未完善、功能尚未全部开发等,因而不乏手机用户仍然持观望态度。

2009年1月7日,中国政府正式向中国移动颁发了TD-SCDMA业务的经营许可,中国

移动也已经开始在中国的 28 个直辖市、省会城市和计划单列市进行 TD-SCDMA 的二期网络建设,已于 2009 年 6 月建成并投入商业化运营。以 TD-SCDMA 网络超常规的建设和优化为基础,TD-SCDMA 市场拓展在中国“3G 元年”也取得骄人成绩。截至 2009 年底,全国 TD-SCDMA 用户数已突破 500 万。计划到 2011 年,TD-SCDMA 网络能够覆盖中国大陆 100% 的地市。

2. 宽带化、移动化趋势

移动通信网正在迅速成为一个宽带互联网业务平台。2004 年初 IEEE 802.16 系列标准(WiMAX)提出之后,整个无线通信领域开始了新一轮的技术竞争,加速了蜂窝移动通信技术演进的步伐。

第三代合作伙伴计划(3GPP)和第三代合作伙伴计划 2(3GPP2)分别在 2004 年底和 2005 年初开始了 3G 演进技术(E3G)的标准化工作。

3GPP 长期演进(LTE)项目是近几年来 3GPP 启动的最大的新技术研发项目,这种以正交频分复用(OFDM)/正交频分复用接入(OFDMA)为核心的技术可以被看作“准 4G”技术。3GPP LTE 项目的主要性能目标包括:在 20MHz 频谱带宽能够提供下行 100Mbit/s、上行 50Mbit/s 的峰值速率;支持 100km 半径的小区覆盖;能够为 350km/h 高速移动用户提供速率高于 100kbit/s 的接入服务;可灵活配置 1.25~20MHz 的多种带宽。2009 年日本颁发了 4 张 LTE 牌照,开始了 LTE 的商用准备。

3GPP2 则提出了空中接口演进(AIE)计划。在技术目标方面,3GPP2 的部分目标是与 3GPP 相似的,如提高频谱资源利用率,提高数据业务的传输速率等。但是,也有部分目标是不同的。3GPP2 在强调提高数据业务速率的,同时也强调提高语音业务的容量。同时,按照 cdma2000 系列标准的一贯传统,强调技术的后向兼容性。AIE 分为两个阶段,第一个阶段采用多载波技术,最多 15 个载波实行捆绑,可支持下行 46.5Mbit/s、上行 27Mbit/s 速率的数据业务;第二阶段采用增强型无线接口,将支持下行 100Mbit/s~1Gbit/s、上行 50~100Mbit/s 速率的数据业务。第一阶段在 2006 年初发布,第二阶段标准在 2007 年年中完成。

为了促进无线城域网技术标准的发展完善和市场推广,由世界知名通信企业联合发起了全球微波互联接入(WiMAX)论坛,在世界范围内推广 IEEE 802.16 协议。WiMAX 论坛的成立大大推动了宽带无线接入技术在全球的发展。技术的不断成熟和 WiMAX 论坛的发展壮大,强烈地刺激了宽带无线接入市场,为全球宽带无线接入系统开启了一个热火朝天的发展契机。

IEEE802.16 标准是工作于 2~66GHz 无线频带的空中接口规范。由于它所规定的无线系统覆盖范围可高达 50km,因此 IEEE 802.16 系统主要应用于城域网。符合该标准的无线接入系统被视为可与数字用户线路(DSL)竞争的“最后一公里”宽带接入解决方案。根据使用频带高低的不同,IEEE 802.16 系统可分为应用于视距和非视距两种,其中使用 2~11GHz 频带的系统应用于非视距范围,而使用 10~66GHz 频带的系统应用于视距范围。根据是否支持移动特性,IEEE 802.16 标准又可分为固定宽带无线接入空中接口标准和移动宽带无线接入空中接口标准。标准系统中的 IEEE 802.16、IEEE 802.16a、IEEE 802.16d 属于固定无线接入空中接口标准,而 IEEE 802.16e 属于移动宽带无线接入空中接口标准。

2006 年,WiMAX 有了实质性进展。IEEE 802.16m 标准将带来高达 1Gbit/s 的无线数据