

OFDM原理与标准 —— 通信技术的演进

OFDM Principles and Standards:
Evolution of Communication Techniques

杨 昉 何丽峰 潘长勇 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

OFDM 原理与标准 ——通信技术的演进

杨 昉 何丽峰 潘长勇 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



内 容 简 介

本书重点介绍当前通信系统最重要的调制技术——正交频分复用（OFDM）的基本原理，并结合地面数字电视传输、移动通信、无线局域网、电力线通信等系统的主流国际标准，详细阐述了 OFDM 技术是如何应用到具体的通信系统设计中的。

随着通信产业的不断发展，不同的通信系统呈现相互融合的趋势，在通信技术选择和系统设计上也趋于相似。本书最大的特色是结合作者参与多个系统标准研制的过程，总结不同系统设计的特色和演进趋势。通过本书的介绍，希望能够使读者对通信系统设计有一个深入而全面的认识，并帮助从事系统设计的研究人员开拓视野，促进不同通信系统的演进和融合。

本书适合从事通信系统设计与开发的研究人员及工程技术人员阅读参考，也适合高等院校通信相关专业的师生阅读。

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

OFDM 原理与标准：通信技术的演进 / 杨昉，何丽峰，潘长勇编著. —北京：电子工业出版社，2013.9
ISBN 978-7-121-21403-5

I. ①O… II. ①杨… ②何… ③潘… III. ①正交频分复用 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 210385 号

责任编辑：苏颖杰

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

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

开 本：787×1092 1/16 印张：16 字数：406 千字

印 次：2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

序

正交频分复用 (OFDM) 技术诞生于 20 世纪中叶, 经过不断地发展和完善, 到 90 年代开始逐渐商用。由于其高频谱效率、支持宽带传输等优势受到广泛青睐, 被大量通信系统标准选为基础传输技术, 如今已经被广泛应用在数字电视、移动通信、无线局域网、电力线通信等系统中。在其发展过程中, 研究人员围绕着 OFDM 系统的同步、信道估计、抗干扰和峰均比等问题, 提出大量的解决方案, 有力地促进了 OFDM 技术的成熟。同时, 基于 OFDM 的各种技术创新层出不穷, 使得通信传输技术出现“百花齐放”的局面。其中一个例子就是清华大学提出的 TDS-OFDM, 创新地采用训练序列填充数据块间的保护间隔, 从而大幅提高了频谱利用效率, 同时也带来了干扰问题, 为此研究人员提出了各种解决方案, 使得 TDS-OFDM 成功地成为中国数字电视传输标准的基础技术之一。正是通过对通信技术的不断创新和改进, 通信产业才得以如此高速、蓬勃地发展。

近年来, 随着通信产业的不断发展和演进, 不同通信系统呈现出相互融合的大趋势。譬如数字电视希望支持手持移动终端接收, 并实现双向传输以支持交互业务; 移动通信希望在业务热点区域通过小型基站提高数据吞吐率, WiFi 则希望在实现高吞吐率的基础上更好地支持移动性; 电力线不仅可以用来承载电流, 还可以用来传输信息, 甚至支持高速数据传输……另外, 不同通信方式的不同特点决定了在系统设计时有着不同的考虑, 即使相同原理的技术也会有各种巧妙的设计, 使得该技术在不同的应用场景下发挥最大优势。以 OFDM 为例, 虽然上述通信系统中都采用了 OFDM, 但是其各自的设计又有着很大的不同之处, 在具体设计时需要结合应用场景、信道特征、设备成本等多种因素综合考虑。学习和借鉴其他通信系统的设计思路, 有利于开拓视野、启发创新, 促进通信系统的演进与融合。

本书的三位作者都是工作在通信技术标准研制一线的科研工作者, 都曾在清华大学电子工程系学习和工作; 现在分别在电力线通信、移动通信、数字电视传输技术方面进行技术研究和标准化工作, 在不同的研究领域积累了丰富的工作经验和研究基础, 并取得了可喜的成绩。这样三位有着相似的背景基础又工作在不同领域的研究人员, 将各自领域的系统设计方案做一个横向的总结和比较, 是一次大胆的尝试, 符合当前通信系统的演进方向。

本书围绕着当前最主要的通信调制和复用方式——OFDM, 在介绍其技术原理基础之上, 总结了一些典型的基于 OFDM 扩展的技术方案。同时, 在本书中, 作者结合自身的科研经历, 横向比较了多种通信系统的设计方案, 梳理了各种通信系统在采用 OFDM 设计时的出发点和技术方案, 给读者一个全面的认识, 以启发不同领域的科研人员融会贯通, 互相借鉴已有系统的设计优点。希望本书的出版, 为从事通信技术研究和标准制定的科研工作者提供参考, 设计出更优秀的通信系统和标准。



二零一三年仲夏于清华园

前 言

随着通信产业的发展，各种不同的通信方式已经深入影响到人们日常生活的每一个方面，人们对通信的需求也日益迫切。如今，通信正呈现出数字化、宽带化的趋势，各种新的通信技术层出不穷，致力于满足人们对宽带、高速、可靠通信的需求。

正交频分复用（OFDM）技术从提出至今，已有 50 多年的历史。由于其高频谱效率、适合宽带传输等优势，被数字电视（DTV）、无线局域网（WLAN）、移动通信等多种通信系统采用，成为宽带数字通信的基础调制方案之一。经过长期的发展和演进，OFDM 的各项关键技术已经逐渐成熟，尤其是结合多天线传输的 MIMO-OFDM 的发展，使得通信系统容量得到显著的提升。如今，OFDM 在各种通信系统中得到广泛的应用，从有线通信到无线通信，从远距离通信到近距离通信，从宽带传输到窄带传输，从电磁波传输到光传输，都将 OFDM 作为重要的调制方式。可以预见，在下一个革命性的通信调制方式出现之前，OFDM 将作为一种基础调制技术长期受到产业界的关注和青睐。

本书作者长期工作在通信技术研究的一线，有幸接触和深入了解多种通信标准的制定过程。在参与不同系统研制的过程中，一个深刻的体会就是，通信系统的基础原理是相同的，设计思路也是相通的，不同通信系统在设计时可以相互借鉴和启发。比如，为了在资源调度和信令开销之间取得折中，LTE 和 WiMAX 都将多个时频资源组合在一起作为资源调度的最小单位；为了尽可能加快解调速度并减少信令开销，DVB-T2 和 LTE 都设计了多级的信令指示方式；为了提高系统峰值速率，提高带宽是一种最直接的手段，但是可用的连续频谱是有限的，因此在 LTE-Advanced 和 WLAN 系统中都支持连续和非连续的频谱聚合……这样的例子不胜枚举。因此，如果能够将各个通信系统设计的特点和出发点做一个全面的介绍，无疑能够帮助研究人员开拓思路，从中汲取精华，有利于设计更高效的通信系统。

出于上述考虑，本书旨在对 OFDM 的基础原理和系统设计做一个全面的介绍，其内容主要包括两大部分：第一部分介绍了 OFDM 调制的关键技术原理，包括调制技术和解调技术，并对基于 OFDM 系统的各种拓展技术做一些简单介绍；第二部分以一些成熟的通信系统标准为例，围绕着通信系统设计的四大基本问题，即同步信号设计、参考信号设计、控制信号设计以及资源分配与传输方式，介绍基于 OFDM 的通信系统是如何设计的。通过对不同通信系统的分析和比较，希望能够帮助读者理解 OFDM 关键技术是如何结合具体应用场景使用的。

本书的出版得到清华大学数字电视中心多位师生的大力支持和热情帮助。吴佑寿院士是通信界德高望重的前辈，虽年届耄耋仍抽空为本书作序，体现了老一代科学家对晚辈的关爱与勉励；宋健教授对本书的内容和结构提出了宝贵的指导意见，对书稿质量提高作出很大

的贡献；颜克茜、丁文伯、刘思聪等博士研究生为本书提供了大量素材并参与校对工作，在此致上诚挚的谢意。最后，还要特别感谢中国移动通信研究院无线领域总工刘光毅博士审阅相关章节并提出宝贵意见。

限于作者的水平以及写作的时间，本书难免存在一些表述不准确甚至是纰漏错误的地方，请读者见谅，并请指正为盼。

编 著 者

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

上篇 原 理 篇

第 1 章 绪论	1
1.1 数字宽带通信需求	3
1.2 OFDM 发展历程	3
1.3 OFDM 标准的演进	5
1.3.1 地面数字电视标准的演进	5
1.3.2 WLAN 标准的演进	6
1.3.3 移动通信标准的演进	6
1.3.4 电力线通信标准的演进	8
1.4 本书内容结构	8
参考文献	10
第 2 章 通信信道特征与调制技术的演进	11
2.1 无线传输信道的特征	11
2.1.1 信道大尺度效应	11
2.1.2 信道小尺度效应	13
2.1.3 实际信道模型	16
2.2 传统调制方案	18
2.2.1 模拟调制	18
2.2.2 脉冲编码调制	19
2.2.3 单载波数字调制	19
2.2.4 CDMA	20
2.3 块传输技术	23
2.3.1 正交频分复用系统	24
2.3.2 单载波频域均衡系统	26
本章小结	27
参考文献	27
第 3 章 OFDM 调制关键技术	29
3.1 信号模型	29
3.2 保护间隔	30
3.2.1 零符号填充	31
3.2.2 循环前缀填充	31
3.2.3 训练序列填充	32

3.2.4	保护间隔与帧体参数设计	32
3.3	导频设计	33
3.3.1	块状导频	33
3.3.2	梳状导频	33
3.3.3	离散导频	33
3.3.4	导频图案参数设计	34
3.4	频谱成型	34
3.4.1	虚拟子载波成型	34
3.4.2	时域加窗	36
3.4.3	频谱成型滤波器	37
3.5	峰均比抑制技术	38
3.5.1	时域削峰	40
3.5.2	压扩变换法	41
3.5.3	子载波预留法	43
3.5.4	动态星座扩展法	43
3.5.5	扰码和交织	45
3.5.6	选择映射法	46
3.5.7	部分传输序列法	46
3.5.8	编码法	47
3.5.9	矩阵变换法	48
3.6	OFDM 多址接入	49
3.6.1	OFDM-FDMA	50
3.6.2	OFDM-TDMA	51
3.6.3	OFDM-CDMA	52
3.6.4	FH-OFDMA	53
3.7	自适应调制	53
3.7.1	注水原理	55
3.7.2	贪婪算法	56
3.7.3	性能余量最大化算法	57
3.7.4	误码率最小化分配算法	58
3.8	MIMO-OFDM	60
3.8.1	空间分集	61
3.8.2	空间复用	64
3.8.3	波束赋形	65
	本章小结	66
	参考文献	67
第 4 章	OFDM 接收机关键技术	69
4.1	同步技术	69

4.1.1	同步偏差	69
4.1.2	符号定时同步	72
4.1.3	载波同步	79
4.1.4	采样时钟同步	81
4.2	信道估计技术	83
4.2.1	LS 算法	83
4.2.2	MMSE 算法	84
4.2.3	L-MMSE 算法	84
4.2.4	判决反馈的信道估计	85
4.2.5	插值	85
4.3	均衡技术	86
4.3.1	时域均衡与频域均衡	87
4.3.2	线性均衡与非线性均衡	87
4.3.3	TDS-OFDM 迭代干扰消除	88
4.4	MIMO-OFDM 解调	89
4.4.1	分层空时码的译码	89
4.4.2	空时分组码的译码	90
4.4.3	LS 准则下的 MIMO-OFDM 信道估计方法	90
	本章小结	94
	参考文献	94
第 5 章	OFDM 扩展技术	96
5.1	Flash-OFDM	96
5.1.1	Flash-OFDM 的物理层	97
5.1.2	Flash-OFDM 的 MAC/LLC 层	97
5.1.3	Flash-OFDM 的网络层	97
5.2	V-OFDM	97
5.2.1	V-OFDM 的主要模块	98
5.2.2	V-OFDM 的系统模型	98
5.3	W-OFDM	99
5.4	TDS-OFDM	100
5.5	MB-OFDM	101
5.6	多载波 CDMA	103
5.6.1	MC-CDMA	104
5.6.2	MC-DS-CDMA	105
5.6.3	MT-CDMA	105
5.7	Wavelet-OFDM	106
	本章小结	108
	参考文献	108

下篇 标准篇

第6章 数字电视广播系统	110
6.1 系统设计需求	110
6.2 DVB-T	111
6.2.1 帧结构	112
6.2.2 同步设计	113
6.2.3 参考信号设计	114
6.2.4 控制信号设计	115
6.2.5 资源分配与传输	116
6.2.6 DVB-H 对 DVB-T 的拓展	117
6.3 ISDB-T	119
6.3.1 帧结构	119
6.3.2 同步设计	121
6.3.3 参考信号设计	121
6.3.4 控制信号设计	122
6.3.5 资源分配与传输	124
6.4 DTMB	125
6.4.1 帧结构	126
6.4.2 同步设计	128
6.4.3 参考信号设计	133
6.4.4 控制信号设计	133
6.4.5 资源分配与传输	134
6.4.6 针对移动系统优化	134
6.5 DVB-T2	135
6.5.1 帧结构	136
6.5.2 同步设计	137
6.5.3 参考信号设计	140
6.5.4 控制信号设计	141
6.5.5 资源分配与传输	145
6.5.6 抑制 PAPR 技术	148
6.5.7 多天线发射分集	150
本章小结	151
参考文献	151
第7章 移动通信系统中 OFDM 应用	154
7.1 系统设计需求	154
7.2 LTE	154
7.2.1 帧结构	155

7.2.2	同步设计	161
7.2.3	参考信号设计	164
7.2.4	控制信号设计	169
7.2.5	资源分配	175
7.2.6	多天线技术	179
7.3	LTE-Advanced	184
7.3.1	参考信号优化	184
7.3.2	MIMO 增强	188
7.3.3	载波聚合	189
	本章小结	191
	参考文献	191
第 8 章	无线局域网	192
8.1	系统设计需求	192
8.2	IEEE 802.11a	193
8.2.1	帧结构	194
8.2.2	同步设计	194
8.2.3	参考信号	196
8.2.4	控制信号设计	196
8.2.5	资源分配	197
8.2.6	时域加窗	197
8.3	IEEE 802.11n	198
8.3.1	帧结构参数优化	198
8.3.2	同步信号设计	198
8.3.3	参考信号设计	201
8.3.4	控制信号设计	202
8.3.5	多天线传输	202
8.3.6	40MHz 带宽增强	206
8.4	IEEE 802.11ac 增强	207
	本章小结	207
	参考文献	208
第 9 章	电力线通信系统	209
9.1	电力线通信系统设计需求	209
9.2	G.hn	210
9.2.1	帧结构	212
9.2.2	同步设计	214
9.2.3	参考信号	215
9.2.4	控制信号设计	215
9.2.5	资源分配	216

9.3	IEEE 1901	217
9.3.1	帧结构	219
9.3.2	同步设计	222
9.3.3	参考信号	223
9.3.4	控制信号设计	224
9.3.5	资源分配	225
9.4	G3-PLC	230
9.4.1	帧结构	231
9.4.2	同步设计	232
9.4.3	参考信号	233
9.4.4	控制信号设计	233
9.4.5	资源分配	233
	本章小结	235
	参考文献	235
	英文缩略语对照表	237

上篇 原 理 篇

第1章 绪 论

通信在汉语中可以理解为“互通信息”，即人与人之间相互传递信息；通信在英文中是 Communication，这个单词也有交流的意思。通信在本质上就是人与人之间的交流。可以说，通信伴随着人类社会的诞生就出现了。原始人可以通过声音、手势等方式进行交流。但人们不仅仅满足于面对面的交流，还希望能够实现远距离的交流，因此有了托人捎信、飞鸽传书、烽火传讯、驿使报信等信息传输方式。

到了近代，通信技术迅速发展，使得人类通信方式甚至生活方式发生了巨大的变化。下面列举一些载入通信史册的划时代事件：

1835 年，美国人塞缪尔·莫尔斯（Samuel F. B. Morse）发明了第一台电报机，标志着近代通信正式诞生，以他名字命名的莫尔斯代码成为国际通用电码并被沿用至今。

1876 年，意大利人安东尼奥·梅乌奇（Antonio Meucci）发明了世界上第一部电话，该专利权被美国人亚历山大·贝尔（Alexander G. Bell）获得并创立了贝尔电话公司，即后来的 AT&T 公司，著名的贝尔实验室（Bell Labs）即该公司的研究机构。

1897 年，意大利工程师伽利尔摩·马可尼（Guglielmo Marconi）第一次实现了跨越大西洋的无线电电报，标志着人类社会迈入无线通信时代。无线电电报在当时被认为是基础性的创新，马可尼也因此获得 1909 年诺贝尔物理学奖。

1966 年，英籍华裔学者高锟（Kuen C. Kao）发表论文从理论上分析证明了用光纤作为传输媒质实现光通信的可能性，并预言了制造超低耗光纤的可能性。光纤的发明使得远距离大容量的信息传输成为可能，如今横跨各大洲的海底光缆将世界各地紧紧地连接在一起。

1973 年，美国摩托罗拉公司工程师马丁·库帕（Martin L. Cooper）和他的团队研制出世界上第一台真正意义上的移动电话。从此之后，移动电话经过不断演进，成为今天人们所熟悉的手机。

1978 年，美国贝尔实验室开发了先进移动电话业务（AMPS）系统，这是第一个形成规模网络的蜂窝移动通信系统，可以支持大覆盖范围内随时随地的通信。

“旧时王谢堂前燕，飞入寻常百姓家”，当年只有富人才用得起的手机如今已经成为普通百姓随身携带的生活工具。随着智能手机的发展，移动通信和互联网不断融合，使得电信技术（Communication Technology, CT）和信息技术（Information Technology, IT）相互交叉融合，被称为 ICT，人类社会由此进入移动互联网时代。通信正在深刻地改变人类的生活方式。

通信产业的迅猛发展离不开通信技术的不断创新。以移动通信系统为例，第一代移动通

信（20 世纪 80 年代）主要采用模拟调制的方式，频谱利用效率很低，通信设备也非常昂贵，很多人可能对“大哥大”还有记忆，那个时代“大哥大”是非常珍贵的商品，甚至成为身份的象征；到第二代移动通信时代（20 世纪 90 年代），全球主流的 GSM^① 系统开始采用数字调制方式，通信速率显著提高；GSM 方兴未艾，以码分多址（CDMA）为主要技术特征的第三代移动通信（3G）蓬勃发展，通信速率是 2G 的数十倍。如今，以正交频分复用（OFDM）为基础调制技术的第四代移动通信（4G）已经逐渐在全球几十个国家进入商用阶段，4G 网络可以为用户提供随时随地的互联网接入，实现了宽带移动化的愿景。2013 年，在世界移动通信大会（MWC）期间，欧盟又启动了面向未来移动通信的 5G 项目，预计在 2020 年左右完成 5G 系统的研制工作。移动通信的发展可谓日新月异。

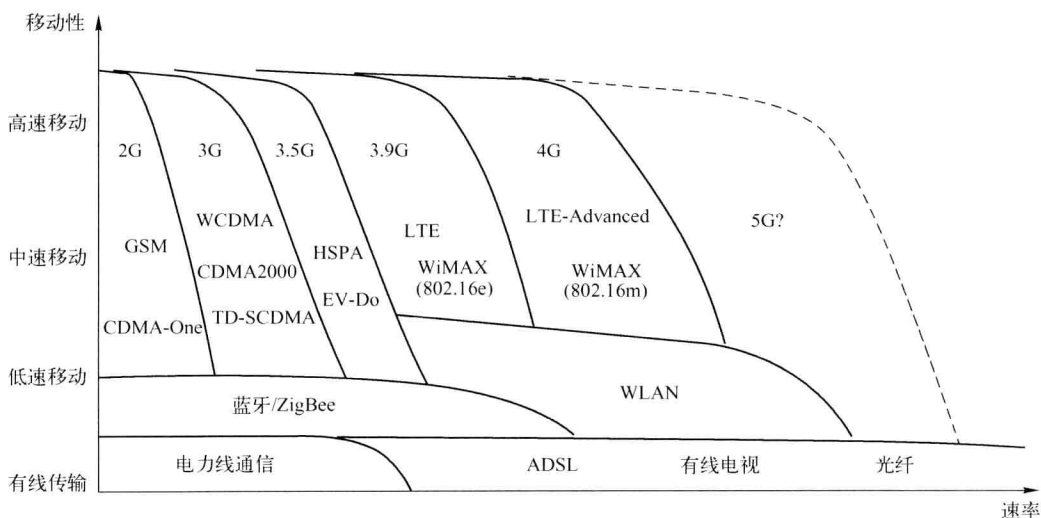


图 1-1 通信技术演进趋势

按照信息传输的媒介划分，通信可分为有线通信和无线通信。有线通信指通过双绞线、同轴电缆、光纤、电力线等有线的传输方式传输信息。其中，光纤、同轴电缆的信道条件较好，适合远距离传输；电力线通信（Power Line Communication, PLC）通过普通的电力传输线传输信号，信道条件比较恶劣，但是由于电力线非常普遍，而且几乎所有的家用电器都必须连接电力线，自然形成传输网络，因此近年来电力线通信受到广泛关注。无线通信主要指通过无线电波（包括短波、微波甚至可见光）传输，电磁波在空间传输，存在衰减、反射、折射、衍射等各种非理想因素，信道条件相对恶劣，但是能够支持自由行走，不像有线通信那样被限制在一个很小的区域内。随着无线通信技术的发展，无线通信越来越成为人们主流的通信方式。

按照信息传输的方向划分，通信可以分为一对多的广播式通信和点对点的双向通信。广播式通信只考虑发送，像传统的广播、电视等，为了保证覆盖区域内所有用户都能接收到信号，广播式通信需要考虑最差的情况；点对点通信需要同时考虑发送和接收，因此需要设计合适的双工方式。

按照信息传输的形式划分，通信可分为连续传输（Continuous Transmission）和突发传输

① GSM 最初来源于法语“Groupe Spécial Mobile”，意为移动专家组，后来为了推向国际市场，改名为 Global System of Mobile communication，即全球移动通信系统。

(Burst Transmission)形式。连续传输指一旦连接,信息传输时间较长的通信方式;突发传输指每次传输数据量较少,但是连接次数频繁的通信方式。

不同的通信方式对系统设计的要求不同,采用的关键技术也不尽相同。通信系统设计的任务就是针对该系统所应用的场景和需求,选择最合适的传输技术,使系统性能最优。

1.1 数字宽带通信需求

人们对通信的需求不断提升,从固定电话到家庭宽带,从无线语音通话到无线高速上网,从模拟电视到数字高清电视,通信技术的整体呈现出“数字化”和“宽带化”的发展趋势。为了满足人们的数字化、宽带化通信需求,一个优秀的通信系统必须具备如下特征:

(1) 高数据速率

数据速率是通信的基本目标,即在各种有限的条件下传递更多的信息。以数字电视为例,一套标清数字电视节目只需 3~5Mbps 数据速率即可,而一套高清数字电视节目需要约 10Mbps 数据速率,一套 3D 电视节目的总传输速率大约为 16Mbps。如果将来想实时观看蓝清晰度的电视节目,则需要至少 54Mbps 的传输速率。

(2) 高频谱效率

随着各种无线通信产业的发展,频谱已经成极为宝贵的稀缺资源,甚至被认为是一个国家重要的战略性资源。2008 年美国联邦通信委员会(FCC)拍卖 700MHz 无线频段,创下了 195.9 亿美元的记录。人们对无线电频谱资源的需求急剧膨胀,使得各种无线通信技术与应用的竞争愈加激烈。提高频谱效率,使得在有限的频带中获得更高的系统容量,是通信系统设计的基本要求。

(3) 高传输可靠性

通信的目的是“信息的无误传输”,因此通信系统对传输可靠性要求非常高,而信息传输的信道环境通常千差万别。光纤、同轴电缆等有线传输方式,可以获得较好的信道条件,可用于长距离传输,但是随着距离的增加,信号衰减、畸变、干扰随之加剧;在无线传输条件下,发射信号在空间经过路损、反射才能到达接收端,信号畸变非常严重,必须采用先进的调制编码技术、复杂的信道估计与均衡技术,克服信道中的不理想因素,保证信息的无误传输。

(4) 低成本

网络运营商建设通信基础设施需要考虑成本,用户购买通信终端设备也需要考虑成本,低成本设计永远是通信技术发展的驱动力。如果从信息论的角度看,通信是“每单位带宽能够提供的信息容量”;从经济学的角度看,通信就是“每单位货币能够提供的比特数”,甚至有学者将信息时代的经济模式称为“比特经济”^①。

1.2 OFDM 发展历程

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,正交频分复用)作为一种高效的传输技术,从 20 世纪 90 年代开始被广泛应用到各种通信系统中,成为一种基础调制方案。本节将简单回顾一下 OFDM 技术的发展历程。

^① 舒华英. 比特经济[M]. 北京: 商务印书馆, 2012.

OFDM 起源于多载波调制（Multi-Carrier Modulation, MCM）技术，从最初应用到如今已有 50 多年的历史。20 世纪五六十年代，美国军方开发了世界上第一个多载波调制系统，由于结构复杂、成本昂贵，其应用受到了限制。

1961 年，Franco 和 Lachs 提出了正交多载波调制的基本原理^[8]，为了抵抗时变信道造成的信号衰落，两人提出将高速串行的数据流分解为若干个彼此独立的低速并行数据流，然后分别调制到相互正交的载波上，构成多个窄带数据流并行传输。

1966 年，贝尔实验室的 Robert W. Chang 提出一种带宽受限的多信道传输方法^[9]，其基本思想是子信道频谱部分重叠但又互不影响的载波采用频分复用的方法来并行传输数据，该方案成为 OFDM 系统的原型。他的同事 Burton R. Saltzberg 分析了该系统的性能，指出这种正交并行传输系统设计的关键在于减少相邻信道间的干扰^[10]。

在当时，OFDM 系统要通过模拟电路产生多个载波实现并行传输，需要大量的正弦波发生器、滤波器、相干解调器等复杂且昂贵的器件，因此 OFDM 技术虽然被提出，但是发展缓慢。直到 1971 年，Weinstein 和 Ebert 提出了使用离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）来实现 OFDM 调制和解调^[11]，大大简化了正交载波的生成方法，并解决了相干解调器本地载波之间严格同步的问题，使得全数字化实现 OFDM 成为可能。

1980 年，Peled 和 Ruiz 提出采用循环前缀（Cyclic Prefix, CP）作为 OFDM 符号的保护间隔^[12]，使得 OFDM 信号经过多径信道后仍然保持各子载波间的正交性。至此，OFDM 基础调制技术的实现方案基本成形，奠定了 OFDM 无线通信系统的基础。

在 20 世纪 80 年代，OFDM 调制技术逐渐成为研究热点，并有研究机构开发出完整的基于 OFDM 技术的试验系统。例如，1981 年，Hirosaki 采用基于 DFT 实现的 OFDM 调制技术试验成功了 16QAM 多路并行传送 19.2kbps 的电话线调制器（Modem）；1985 年 Cimini 提出将 OFDM 用于无线通信的设想^[13]，并由贝尔实验室开发出试验样机。

到 20 世纪 90 年代，先进的数字信号处理技术和大规模集成电路的飞速发展使 OFDM 技术的应用提供了极大便利，快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）技术的成熟使得 OFDM 调制和解调的复杂度大幅降低，OFDM 技术受到学术界和产业界的极大关注和广泛研究。OFDM 被广泛应用于各种数字通信系统中，如数字音频广播（Digital Audio Broadcasting, DAB）系统、非对称数字用户线系统（Asymmetrical Digital Subscribe Line, ADSL）、数字视频广播（Digital Video Broadcasting, DVB）、无线局域网（Wireless Local Access Network, WLAN）、第四代移动通信（4G）等。图 1-2 列举了 OFDM 的技术演进与主要国际标准发展的时间表。

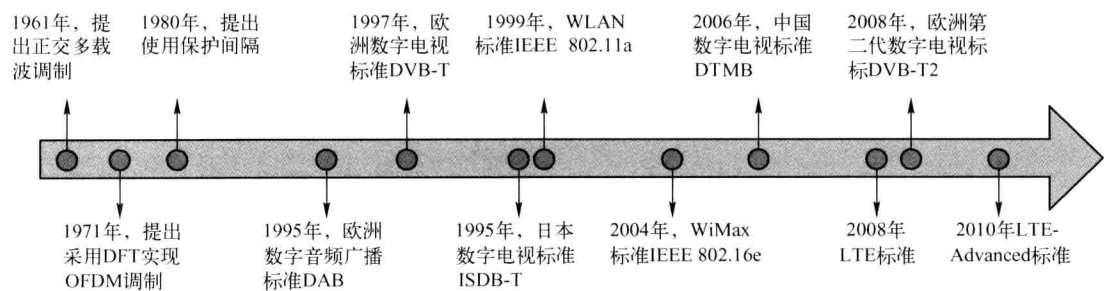


图 1-2 OFDM 的技术演进与主要国际标准发展时间表