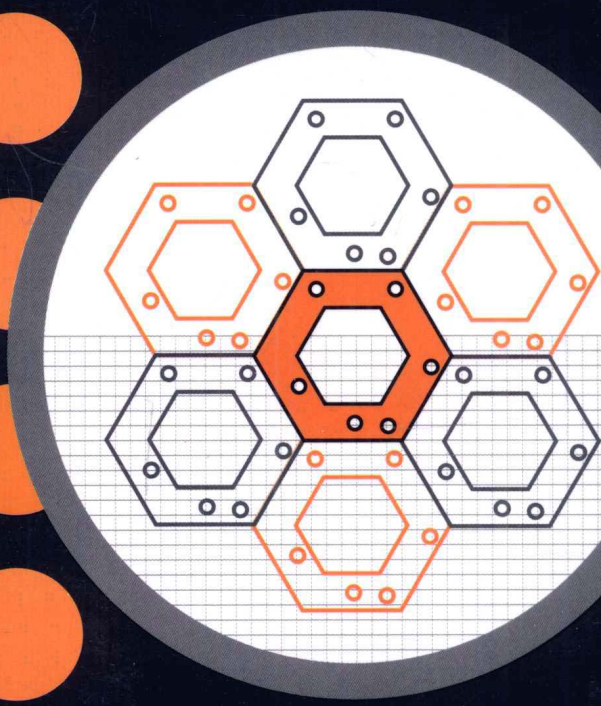
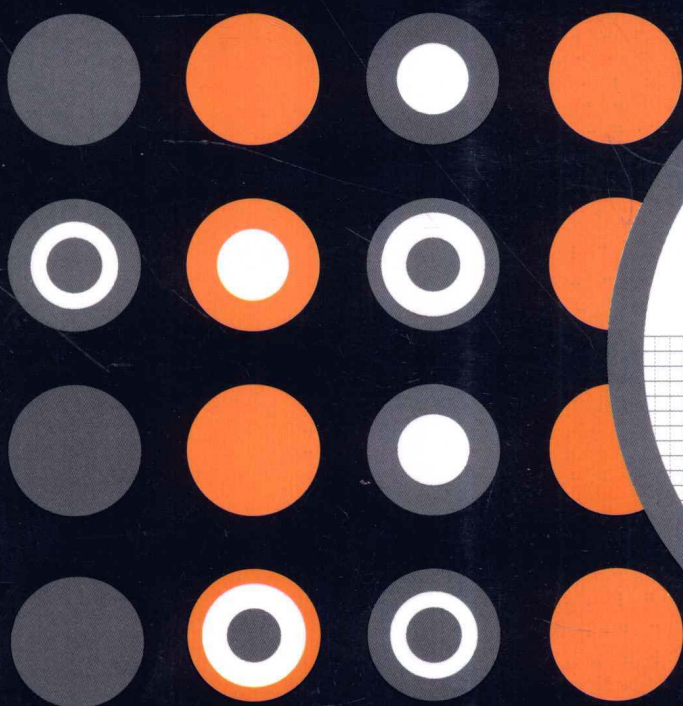


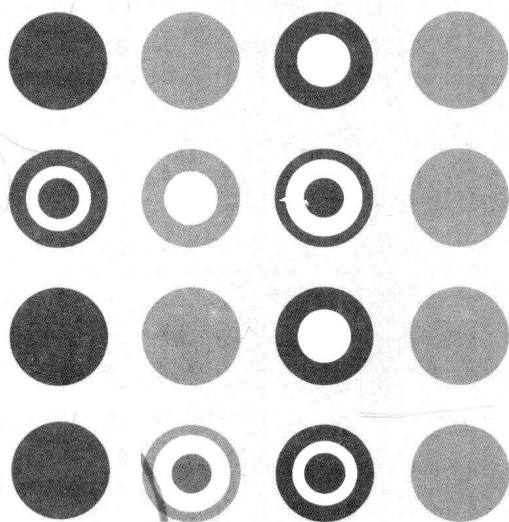
宽带无线通信 OFDM系统同步技术

■ 艾渤 王劲涛 钟章队 著



宽带无线通信 OFDM系统同步技术

■ 艾渤 王劲涛 钟章队 著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

宽带无线通信OFDM系统同步技术 / 艾渤, 王劲涛, 钟章队著. — 北京: 人民邮电出版社, 2011.4
ISBN 978-7-115-24882-4

I. ①宽… II. ①艾… ②王… ③钟… III. ①宽带通信系统—无线电通信—同步—通信技术 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第018796号

内 容 提 要

本书介绍了作为 B3G/4G 核心技术的 OFDM 及其相关技术、标准和系统; 深入阐述了宽带无线移动通信 OFDM 系统中的同步问题, 主要包括连续及突发分组两种传输模式下的符号定时同步、载波频率同步和采样钟同步技术。还对当前无线通信热门技术中的 OFDMA、TDS-OFDM 中的同步进行了分析与阐释, 提出了新的同步方案和算法。

本书是一部专门阐述 OFDM 系统及其同步技术的理论书籍, 可作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生学习 OFDM 系统同步技术的教材或参考书, 也可作为从事无线通信的工程技术人员培训教材或自学参考书。

宽带无线通信 OFDM 系统同步技术

- ◆ 著 艾 渤 王劲涛 钟章队
责任编辑 王建军
执行编辑 李 静
- ◆ 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>
北京铭成印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 11.5 2011 年 4 月第 1 版
字数: 218 千字 2011 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24882-4

定价: 36.00 元

读者服务热线: (010) 67119329 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

前 言

随着 Internet 商用化所带动的视频、音频及数字通信技术的发展,人们对无线通信寄予了更高的希望。基于宽带化、分组化、综合化、个人化的未来无线移动通信系统,使实现“全球信息村”这个美好愿望的蓝图正不断地清晰起来。但这一目标的实现面临许多技术挑战,恶劣的移动无线信道引起的信号幅度、相位的畸变等因素会严重影响无线通信系统的性能。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)及其相关技术以频谱利用率高,抗多径和脉冲噪声,在高效带宽利用率情况下的高速传输能力,根据信道条件对子载波进行灵活调制及功率分配的能力,以及成本低廉等优点,在众多领域得到广泛应用,已成为未来第 4 代多媒体移动通信系统的关键传输技术。但 OFDM 系统的主要缺陷之一在于对同步误差十分敏感,本书针对这一关键性问题,深入研究了以 OFDM 技术为核心,在连续与突发分组两种传输模式下宽带无线通信中 OFDM 及其相关系统中的同步问题。

正是基于 OFDM 技术成为 B3G/4G 系统的核心技术,本书致力于 OFDM 系统中同步技术的理论阐述,力图从理论层面分析 OFDM 系统中的同步问题,希望能对宽带无线通信系统发展有一定的理论意义。本书提出的关于 OFDM 系统的同步方案,主要涉及符号定时同步技术、载波频率补偿技术和采样钟恢复技术等方面。

本书共分 8 章。序言部分及第 1 章由钟章队撰写;第 2 章由艾渤、王劲涛撰写;第 3 章、第 4 章、第 5 章及第 6 章由艾渤撰写;第 7 章由王劲涛撰写;第 8 章由王劲涛、艾渤撰写。在本书的撰写过程中,得到了轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)、清华大学数字电视技术研究中心、西安武警工程学院的老师 and 同学、西安电子科技大学通信工程学院王勇副教授、华中科技大学江涛教授的大力支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。本书的研究内容受到国家自然科学基金青年基金项目(编号:60901004)、教育部新世纪优秀人才项目(编号:NCET-09-0206)、国家自然科学基金重点项目(编号:60830001)、轨道交通控制与安全国家重点实验室重点项目(编号:RCS2008ZZ006)、轨道交通控制与安全国家重点实验室开放课题(编号:RCS2009K009)、陕西省自然科学基金基础研究计划(编号:20009JQ8004)的资助;同时受到教育部长江学者与创新团队计划(编号:IRT0949)、北京市科技新星计划(A类)(编号:2009A16)的资

助。借此机会特别向国家自然科学基金委员会、教育部、科技部、陕西省自然科学基金委员会、北京市科委、轨道交通控制与安全国家重点实验室所给予的大力资助表示衷心的感谢！

作者水平有限，书中错误在所难免，敬请同仁与读者批评指正。

作 者

2010 年 11 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 无线移动通信系统的发展	1
1.2 OFDM 及其相关技术的发展	3
1.2.1 OFDM 技术的优点	3
1.2.2 OFDM 两大技术难题	4
1.3 本书的篇章结构安排	5
参考文献	6
第 2 章 OFDM 及其相关技术	9
2.1 OFDM 技术的基本原理	9
2.1.1 OFDM 技术的基本思想	9
2.1.2 OFDM 调制数学模型	11
2.1.3 OFDM 传输系统的物理框架	12
2.1.4 OFDM 系统参数的选择与优化	13
2.1.5 OFDM 系统的技术特点	16
2.2 OFDM 相关技术	17
2.2.1 VOFDM	17
2.2.2 W-OFDM	17
2.2.3 OFDMA	19
2.2.4 Flash-OFDM	24
2.2.5 MIMO-OFDM	27
2.2.6 TDS-OFDM	31
2.2.7 MB-OFDM	35
2.3 OFDM 系统中的关键技术	36
2.3.1 同步技术	38
2.3.2 信道估计与均衡技术	38
2.3.3 PAPR 降低技术	40
2.3.4 功率放大器线性化技术	44
2.3.5 相位噪声自适应补偿技术	46

2.4 本章小结	46
参考文献	47
第 3 章 OFDM 系统中的同步技术	51
3.1 连续传输模式与突发分组传输模式	51
3.2 OFDM 系统的整体同步方案	52
3.3 OFDM 系统同步技术的国内外研究进展	54
参考文献	55
第 4 章 OFDM 系统中的符号定时同步	57
4.1 符号定时同步整体方案	57
4.2 符号定时同步分析	58
4.2.1 AWGN 信道	58
4.2.2 多径衰落信道	59
4.3 连续传输模式下的符号定时同步	62
4.3.1 时域符号定时粗同步	62
4.3.2 频域符号定时细同步	74
4.3.3 符号定时同步控制模型	79
4.4 突发分组传输模式下的符号定时同步	81
4.5 本章小结	84
参考文献	85
第 5 章 OFDM 系统中的载波频率同步	88
5.1 OFDM 系统中的载波频率偏移	88
5.1.1 载波频率偏移的数学分析	88
5.1.2 载波频偏恢复整体方案	92
5.2 连续传输模式下的整数倍载波频率同步	93
5.2.1 典型算法及性能分析	93
5.2.2 新算法性能对比	94
5.3 连续传输模式下的分数倍载波频率粗同步	99
5.3.1 典型算法及性能分析	100
5.3.2 新算法性能对比	102
5.3.3 分数倍载波粗频偏估计的时域调节模型	104
5.4 连续传输模式下的分数倍载波频率细同步	106
5.4.1 典型算法及性能分析	106

5.4.2 小数倍载波频偏估计调节模型	109
5.4.3 载波频偏控制模型	111
5.5 突发分组传输模式下的载波频率偏移估计	112
5.6 本章小结	115
参考文献	116
第 6 章 OFDM 系统中的采样钟同步	121
6.1 采样钟同步技术概述	121
6.2 同步采样系统中的采样钟同步算法	124
6.2.1 典型算法及性能分析	124
6.2.2 采样钟同步新算法	127
6.2.3 采样钟同步调节模型	128
6.3 非同步采样系统中的采样钟同步技术	131
6.3.1 内插滤波	132
6.3.2 NCO 控制	134
6.4 突发分组传输模式下的采样钟同步	134
6.5 本章小结	137
参考文献	137
第 7 章 OFDM 相关技术中的同步	140
7.1 相关技术中的同步基础知识	140
7.1.1 同步的数学基础	140
7.1.2 OFDM 系统的信号模型	142
7.1.3 OFDM 系统的似然函数	144
7.2 TDS-OFDM 系统中的同步	145
7.2.1 TDS-OFDM 系统的同步基础	146
7.2.2 频率估计	152
7.3 OFDMA 下行系统中的同步技术	156
7.3.1 OFDMA 子载波分配原理	156
7.3.2 OFDMA 系统模型	157
7.3.3 OFDMA 下行链路的同步技术	158
7.4 OFDMA 上行系统中的同步技术	160
7.4.1 OFDMA 上行链路系统模型	160
7.4.2 OFDMA 上行链路的同步技术	162
7.4.3 上行链路中的时间和频率偏移补偿	165

7.5 本章小结	169
参考文献	169
第 8 章 未来同步技术的发展	171
8.1 未来宽带移动通信对同步的要求	171
8.2 同步技术的难点	171
8.3 本章小结	172
附录 A 符号含义	173
附录 B 缩略语	175

第1章 概述

当前,随着 Internet 商用化所带动的视频、音频及数字通信技术的发展,人们对无线通信寄予了更高的希望。无线移动通信作为通信行业的新兴领域正在进行着日新月异的发展,寻求一种大容量、高速率的无线网络已经成为无线通信发展的必需和必然。为此,在过去的 10 多年中,向第三代移动通信系统(Third-Generation Mobile System, 3G)标准发展的全球性浪潮,使相关厂商纷纷参与了新技术的标准化工作。然而,信息技术的发展日新月异,当新一代技术刚推出市场不久,更新的技术已经在实验室进行研发。在我们期待 3G 系统带来优质服务的同时,第四代移动通信系统(4G)的最新技术已在实验室悄然进行当中。在新世纪之初,世界各国都把研发的焦点聚集到“无线宽带多媒体通信系统(Wireless Broadband Multimedia Communication System, WBMCS)”上来,宽带化、分组化、综合化、个人化的未来无线通信系统,使实现“全球信息村”这个美好愿望的蓝图正在不断地清晰起来。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术以其突出的优势在众多领域得到了广泛的应用,成为未来移动通信标准的主要候选传输技术。但 OFDM 系统存在两大难题,即对同步错误敏感和具有高的峰值与均值功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)。

本书研究无线通信 OFDM 系统的同步技术,内容涉及符号定时同步、载波同步、采样钟同步,以及连续传输模式和突发分组传输模式下的同步技术等几个方面。

1.1 无线移动通信系统的发展

移动通信系统经历了第一代和第二代,完成了从模拟技术向数字技术的过渡,当前正经历着第三代(3G)及后 3G(3G+),并向更为诱人的第四代移动通信系统(4G)发展。3G 定位于多媒体 IP 业务,具有大传输容量、高灵活性、高频谱利用率、高服务质量和高保密性等特点,其通信标准分为核心网和空中接口两大部分。为统一全球移动通信标准和频段,提高移动通信的频谱利用率和数据业务传输速率,满足多媒体业务需求,达到 3G 全球漫游的目的,国际电联无线电通信部门(ITU-R)提出了对第三代移动通信的基本要求:① 数据速率可从几 kbit/s

到 2 Mbit/s; ② 高速移动时最高数据速率可达 144 kbit/s; 慢速移动时最高数据速率可达 384 kbit/s; 静止时的最高数据速率可达 2 Mbit/s。码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 技术是 3G 通信系统的核心技术。然而, 随着通信技术的迅猛发展和广泛应用, 为高速业务和多媒体业务设计的 3G 移动通信系统, 在通信容量与质量等方面将远远不能满足人们日益增长的通信需求, 世界各国在推动 3G 通信系统商用化的同时, 已将研究重点放在 4G 移动通信系统的研究上来。4G 在业务、功能、频宽等方面都有别于 3G, 是将所有无线服务统一化, 能在任何地方接入互联网, 包括卫星通信、定位定时、数据采集、远程控制等综合功能。同 3G 等已有的数字移动通信系统相比, 4G 系统具有更高的数据速率和频谱利用率, 更高的安全性、智能性和灵活性, 更高的传输质量和更好的业务质量。4G 系统体现了移动网络与无线接入网和 IP 网络不断融合的发展趋势, 是一个无缝的全 IP 网络。宽带化、分组化、综合化、个人化, 提供无处不在、高质量、高速率, 适应多媒体传输需求的无线通信系统已成为主要发展趋势。现有通信系统主要是为特定的应用而设计的, 如移动电话中的语音服务。而 4G 无线宽带多媒体通信系统 (Wireless Broadband Multimedia Communication Systems, WBMCS) 将会把这些不同的功能和应用集成在一起, 为客户提供数据传输速率超过 2 Mbit/s 的单一服务到多种服务: 终端可以是固定的、移动的或便携的; 用户根据自己的不同需要来选择使用一条或多条不同信道, 系统带宽可以是固定的或根据需要进行动态分配; 终端用户之间可以直接进行通信或者利用 ATM 技术通过基站进行数据传输等。总地来说, 对下一代移动通信系统在性能方面主要有以下要求: 用户速率在准静止 (低速移动和固定) 情况下达 20 Mbit/s, 在高速移动情况下达 2 Mbit/s; 传输容量要达到第三代系统的 5~10 倍; 条件相同时小区覆盖范围等于或大于第三代系统 (小区覆盖率要求达到 98%~99.5%); 具有不同速率间的自动切换能力, 以保证通信质量; 网络的每比特成本要比第三代的低。

但是, 恶劣的无线移动环境会对高质量、高速传输数据带来严重影响。信道传输特性不理想所产生的多径衰落会影响传输信号, 同时各类无线和移动通信系统中也普遍存在着符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI)。解决 ISI 的通常方法是采用自适应均衡器, 但若要在高速数字通信系统尤其是城市环境中克服 ISI, 往往要求均衡器的抽头数足够多, 甚至达到上百个, 这大大增加了均衡器的复杂程度, 使得设备造价和成本很高。在此背景下, 为了满足人们对第四代移动通信系统提出的更高的数据传输速率、更高的频谱利用率、更好的传输质量等要求, 同时为能很好地克服多径衰落, 消除高速数据传输时严重的符号间干扰并大大提高频谱利用率, OFDM 技术以其突出的优点得到了众多专家、学者的青睐, 目前针对 OFDM 在移动通信技术上的应用已提出大量相关的理论基础, 可以说 OFDM 已经成为 4G 移动通信系统的核心技术。

1.2 OFDM 及其相关技术的发展

OFDM 技术的应用可以追溯到 20 世纪 60 年代, 这个时期 OFDM 技术主要应用于军事高频通信系统, 例如 KINEPLE、ANDEFT 及 KATHRYN 等, 但当时 OFDM 系统的结构非常复杂, 从而限制了其进一步推广。参考文献[1]在当时奠定了 OFDM 系统的理论基础。直到 20 世纪 70 年代, 人们提出了采用离散傅里叶变换来实现多个载波的调制, 简化了系统结构, 才使得 OFDM 更趋于实用化。20 世纪 80 年代, 研究的重点放在了如何将 OFDM 技术应用于高速 Modem。进入 90 年代以来, 对 OFDM 技术的研究深入到无线调频信道上的宽带数据传输。在高速(宽带)无线应用环境下, OFDM 技术的优势很突出, 而且可以用有效的新技术去修正和弥补 OFDM 的固有缺点, 现今 OFDM 已被广泛地应用到民用通信系统中。

时至今日, OFDM 已被多个标准所采纳, 例如: 欧洲地面数字视频广播(Terrestrial Digital Video Broadcasting, DVB-T)标准^[2], 数字音频广播(Digital Audio Broadcasting, DAB)标准^[3], 日本综合业务地面数字广播(Terrestrial Integrated Service Digital Broadcasting, ISDB-T)标准^[4-5], 用于高速数据传输的数字用户线 xDSL (Digital Subscriber Line) (包括非对称、高速、超高速数字用户线: ADSL、HDSL、VDSL) 标准^[6], 高速无线局域网标准、ETSI 的 HiperLAN2^[7-8]及 IEEE 802.11^[9], 还有多媒体无线业务如日本的 MMAC (Multimedia Mobile Access Communications) 等; 在 IEEE 802.16.3 标准^[10]中, OFDM 技术还被应用于固定无线接入(Fixed Wireless Access, FWA)系统。不仅在无线方面, 在有线电视(CATV)中也采用了 OFDM 技术^[11]。

随着对 OFDM 技术研究的深入, 出现了应用于不同环境、性能更为优越的 OFDM 技术的各种变形形式, 如: OFDMA (OFDM Access 正交频分复用接入)、VOFDM^[12] (Vector OFDM, 矢量正交频分复用)、W-OFDM^[13] (Wide-band OFDM, 宽带正交频分复用); OFDM 与 CDMA (Code Division Multiple Access, 码分多址)、TDMA (Time Division Multiple Access, 时分多址)、FDMA (Frequency Division Multiple Access, 频分多址) 等技术结合的 R-OFDM (Randomized OFDM, 随机正交频分复用)^[14], OFDM 和小波理论结合的 Wavelet-OFDM 等。总之, OFDM 技术展现出广阔的应用前景, 越来越成为通信研究人员关注的核心技术。

1.2.1 OFDM 技术的优点

OFDM 技术的突出优点表现在以下几方面。

◆ 可有效地对抗信号波形间的干扰,适用于多径环境和衰落信道中的高速率数据传输。当信道中因多径传输出现频率选择性衰落时,只有落在频带凹陷处的载波及其携带信息会受到影响,其他载波不会受到损害。因此,系统总的误码率性能较单载波系统而言要好得多。

◆ OFDM 技术中可通过插入保护间隔(只要保护间隔持续长度大于最大信号延迟),就可以很好地克服 ISI 及 ICI (Inter Carrier Interference, 载波间干扰)。

◆ 由于 OFDM 各子载波间相互正交,允许频谱有 1/2 重叠,而不是传统的利用保护频带分离信道的方式,因此可以大大提高频谱利用率。这一点对实现高速、高效的无线通信系统是至关重要的。

◆ OFDM 系统具有很强的抗脉冲及窄带干扰的能力,因为这些干扰只会影响到很小一部分信道。

◆ 由于深度衰落而丢失的一些子载波可通过编码、交织等措施很好地恢复,使系统误码性能进一步提高。

◆ 与单载波系统相比,若衰落不是特别严重,可不用加信道均衡器,从而降低了系统的复杂度。

◆ 与单载波系统相比,对采样定时偏移不敏感。

◆ 利用 FFT 技术实现调制和解调功能,使得计算和实现更加有效。

1.2.2 OFDM 两大技术难题

OFDM 技术存在两个主要缺陷:

◆ OFDM 信号是由多个经过调制的独立子载波信号相加而成的,这样的合成信号有可能产生较大的峰值功率,从而导致大的峰值与均值功率比(PAPR),该比值的增大会大大降低射频放大器的功率效率,对放大器的线性度要求提高。

◆ 对同步错误敏感,尤其对载波频率偏移和相位噪声非常敏感,若不采取有效措施,多普勒(Doppler)效应会对系统性能产生严重影响。

关于 OFDM 技术中的 PAPR 问题,已有很多参考文献提出了相应的解决方法,如:利用部分发送序列加权^[15-16];用最小距离译码来识别具有高 PAPR 的码字^[17];用代数方法消除大的峰值^[18];对子载波进行差分编码^[19];利用多功率放大器和多传输天线^[20];利用一些映射技术,比如随机交织^[21],利用 m 序列^[22],块编码^[17, 23-26];利用 OFDM 符号中未传送数据的子载波产生附加的信号^[27-28]等。

本书主要研究的是无线通信 OFDM 系统中的同步问题。

1.3 本书的篇章结构安排

本书共分8章,各章节内容安排如下。

第1章概述了OFDM技术的特点。

第2章介绍了OFDM技术的基本原理及当前热门的相关技术,如地面数字移动电话国家标准中所采用的TDS-OFDM技术、多进多出(MIMO)系统中的MIMO-OFDM技术等;阐述了与OFDM技术相关的国际及国家标准情况;阐述了当前OFDM系统中涉及的诸如同步、信道估计与均衡、PAPR降低技术、功率放大器线性化等关键技术的概况。

第3章阐述了OFDM系统整体同步方案;对国内外OFDM系统同步技术的研究进展情况进行了综述;指出了连续传输模式与突发分组传输模式下OFDM系统同步方案的差异。

第4章探讨了符号定时同步问题,阐述了符号定时粗同步、符号定时细同步及符号定时同步控制3方面的内容。分析了目前具有代表性的关于OFDM系统的符号定时同步算法,如Moose P H算法,能较好地适用于AWGN信道;而CP+导频算法与只利用CP的算法相比较,改进的性能并不明显;Schmidl T M等人提出的SCA算法较前两种而言,在多径信道下的性能虽有所改善,但因存在较长的一段“平坦区”而使得估计值仍偏差较大。针对上述的不足,笔者提出了在时域上进行符号定时粗同步的新方法,克服了通常算法估计位置摆动大的不足,且将估计值与实际值的偏差控制在 ± 10 个采样之内,提高了估计精度且缩短了系统同步的捕获时间。最后阐述了突发分组传输模式与连续传输模式下符号定时同步技术的异同。

第5章探讨了OFDM系统中的载波频率同步技术,阐述了载波频率同步的整体方案,提出了突发分组与连续传输模式下新的载波频率恢复算法,包括整数倍频率同步、小数倍粗频率同步、小数倍细频率同步和频率同步控制模型4方面。在关于整数倍频率偏移估计的算法中,提出了3种算法,均可将整偏的估计范围扩大;给出了时域小数倍载波粗频偏和频域小数倍载波细频偏的调节模型。建立起了以时域的小数倍粗频偏估计,频域的整数倍频偏及小数倍细频偏估计相互协调,联合进行载波频率恢复的载波同步控制模型,仿真分析表明了提出的有关载波频率恢复算法、方案的优良性能。

第6章探讨了OFDM系统中的采样钟同步技术。分析了采样钟频率偏移对系统性能造成的影响,阐述并分析了几种同步采样系统和非同步采样系统中采样钟同步的主要方法:利用定时算法控制压控晶体振荡器(Voltage-Controlled Crystal

Oscillator, VCXO), 利用定时算法结合内插滤波及数控振荡器 (Number-Controlled Oscillator, NCO) 实现采样钟同步的方法。仿真分析了在突发分组传输模式下提高频域采样钟误差估计精度的方法; 提出在时域进行采样钟频偏估计的思路, 并提出利用采样钟频率偏移估计值和细符号定时偏移估计值相结合, 对采样钟进行调节的模型。

第 7 章阐述了当前热门的 OFDM 系统相关技术, 如 TDS-OFDM、MIMO-OFDM、OFDMA 中的同步方案及同步算法, 提出了新的算法并与传统方法进行了性能对比分析, 结果表明了所给方法的优良性能。

第 8 章结合当前国内外 OFDM 系统同步技术的研究进展情况, 对未来无线宽带通信对同步的要求进行了阐述; 探讨了同步技术的难点问题, 如高速移动情况下的稳定同步, 突发分组传输模式下的快速同步等; 并对研究内容的最新进展以及同步技术的应用情况进行了展望。

参 考 文 献

- [1] Chang R W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. Bell Systems Technical Journal, 1966, 45(10):1775-1796
- [2] ETS 300 744. Digital broadcasting systems for television, sound and data services; framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. May 1996
- [3] Radio Spectrum Management Group. A draft band plan for digital audio broadcasting ECD 2000/5. December 2000
- [4] Brazilian Test Report. Brazilian test report: comparing ATSC, DVB-T and ISDB-T digital television standards. ABERT/SET. February 2000
- [5] Wu Y Y, Pliszka E, Caron B, *et al.* Comparison of terrestrial DTV transmission systems: the ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM, and the ISDB-T BST-OFDM. IEEE Trans. on Broadcasting, 2000, 46(2):100-112
- [6] Chow P S, Tu J C, Cioffi J M. Performance evaluation of a multi-channel transceiver system for ADSL and VHDSL. IEEE Journal on Select Areas in Communication, 1991, 9(8):909-919
- [7] ETSI TS 101 475 v1.1.1(2000-04). Broadband radio access networks(BRAN); HiperLAN type2;physical(PHY)layer. April 2000
- [8] Johnsson M. HiperLAN/2—the broadband radio transmission technology operating in the 5 GHz frequency band. HiperLAN/2 Forum, 1999
- [9] IEEE P802.11a/D7.0. DRAFT supplement to standard for information technology telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific

- requirements – part II wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: high speed physical layer in the 5 GHz band. July 1999
- [10] The IEEE 802.16 Working Group. IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 16: standard air interface for fixed , broadband wireless access systems. 2001
- [11] Sari H, Karam G. Orthogonal frequency-division multiple access and its Application to CATV networks. *European Trans. On Telecomm*, 1998, 9(6):507-516
- [12] Ayanoglu E, Jones V K, Raleigh G G, *et al.* VOFDM broadband wireless transmission and its advantages over single carrier modulation. IEEE-ISTO broadband wireless internet forum white paper, document WP-1_TG_1, Dec 2000
- [13] 2000 Wi-LAN Inc. Wideband orthogonal frequency division multiplexing (W-OFDM). http://www.wi-lan.com/library/whitepaper_wofdm_general.pdf, June 2000
- [14] A O'Neill. IP networking untethered. http://www.ieee802.org/802_tutorials/march02/IP-Networking-Untethered.pdf, March 2002
- [15] Müller S H, Huber J B. A novel peak power reduction scheme for OFDM. In: *Proc. of IEEE PIMRC'97, Helsinki, September, 1997*
- [16] Cimini Jr L J , Sollenberger N R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences. In: *Proc. of IEEE ICC'99, Vancouver, June 1999*
- [17] Tarokh V, Jafarkhani H. On the computation and reduction of the peak-to-average power ratio in multicarrier communication. *IEEE Trans on Communications*, 2000 48(1):37-44
- [18] Smith J A, Cruz J R, Pinckley D. Method for reducing the peak-to-average of a multicarrier waveform. In: *Proc. of the IEEE VTC'2000, Tokyo, June 2000*
- [19] Friese M. Multicarrier modulation with low peak-to-average power ratio. *Electronic Letters*, 1996, 32(8): 713-714
- [20] Daneshrad B, Cimini Jr L J , Carloni M, *et al.* Performance and implementation of clustered-OFDM for wireless communications. *Mobile Networks and Applications* , 1997, 2(4):305-314
- [21] Jayalath A D S, Tellambura C. Reducing the peak-to-average power ratio of orthogonal frequency division multiplexing signal through bit or symbol interleaving. *Electronic Letters*, 2000, 36(6): 1161-1163
- [22] Eetvelt P V, Wade G, Tomlinson M. Peak-to-average power reduction for OFDM schemes in selective scrambling. *Electronic Letters*, 1996, 32(10): 1963-1964
- [23] Y Zhang, A Yongacoglu, L Zhang, *et al.* OFDM peak power reduction by sub-block-coding and its extended version. In: *Proc. of IEEE VTC'99, Houston, May 1999*
- [24] Wilkinson T A , Jones A E. Minimization of the peak to mean envelope power ratio for multicarrier transmission by block coding. In: *Proc. of IEEE VTC'95, Chicago, July 1995*
- [25] Davis J A , Jedwab. Peak-to-mean power control and error correction for OFDM transmission

using golay sequences and reed-muller codes. Electronics Letters, 1997, 33(2): 267-268

- [26] Davis J A, J Jedwab. Peak-to-mean power control in OFDM, golay complementary sequences and reed-muller codes. IEEE Trans. on Information Theory, 1999, 45(7): 2397-2417
- [27] Mestdagh D J G , Spruyt P M P. A method to reduce the probability of clipping in DMT-based transceivers. IEEE Trans. on Communications, 1996 44(10): 1234-1238
- [28] Dardari D, Tralli V , Vaccari A. A novel low complexity technique to reduce non-linear distortion effects in OFDM systems. In: Proc. of PIMRC'98, Boston Sept 1998