

变革性光科学与技术丛书

**高速光纤通信中
数字信号处理算法原理与应用
(第一卷):
单载波调制技术**

**Digital Signal Processing
in High-Speed Optical Fiber Communication**
Principle and Application (I) : Single Carrier Modulation

余建军 迟楠 著

光
外
借

清华大学出版社



变革性光科学与技术丛书

**高速光纤通信中
数字信号处理算法原理与应用**

(第一卷):

单载波调制技术

**Digital Signal Processing
in High-Speed Optical Fiber Communication**

Principle and Application (I) : Single Carrier Modulation

余建军 迟楠 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍了高速光纤通信技术中采用单载波调制的数字信号处理技术的原理和在系统中的应用。主要内容包括采用单载波调制技术的线性和非线性补偿算法原理和应用,全光奈奎斯特信号产生与处理,以及提高信号接收灵敏度和传输带宽的几何整形和概率整形技术。

本书适合从事通信领域包括光纤通信、无线通信等研究的工程技术人员,以及高等院校通信工程等相关专业的教师和研究生阅读。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高速光纤通信中数字信号处理算法原理与应用. 第一卷,单载波调制技术/余建军,迟楠著. —北京:清华大学出版社,2018

(变革性光科学与技术丛书)

ISBN 978-7-302-49967-1

I. ①高… II. ①余… ②迟… III. ①光纤通信—数字信号—信号处理 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 067801 号

责任编辑:鲁永芳

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印张:17.25 插页:2 字 数:352千字

版 次:2018年4月第1版 印 次:2018年4月第1次印刷

定 价:109.00元

产品编号:076867-01

序

光纤有上百太(T)比特每秒的传输带宽和小于 0.2dB/km 的传输损耗,可以实现超宽带信号的长距离传输。但随着传输距离的增加,信噪比的下降限制了信号的传输距离。随着基于相干光通信处理的数字信号处理技术引入到高速光纤传输系统中,光纤通信技术发生了革命性的变化。相干光通信可以极大地提高信号的接收机灵敏度,从而延长传输距离和增加传输容量。采用数字信号处理的先进算法还能够有效地减小或克服光纤通信系统中的各种线性或非线性效应,极大地提高系统性能。而且最近的研究也表明,这些数字信号处理算法在短距离传输系统包括数据中心光互连中也是非常有用的一项技术。

笔者在高速光传输领域进行了二十余年的研究,在大容量、高速率光纤传输方面创造了许多世界纪录。包括最先实现频谱效率达到 4bit/s/Hz 的相干光传输,最先实现 100G 的 8 相移键控(PSK)信号的传输,最先实现从 400Gbit/s 到 1Tbit/s 到 10Tbit/s 的相干光信号的传输和探测。在高波特传输方面最先实现了最高波特率的 160Gbaud 正交相移键控(QPSK)和 128Gbaud 16 正交幅度调制(QAM)信号的产生和相干探测,该波特率纪录至今没有被打破。在高波特率传输方面最先实现 256QAM 信号产生传输速率每信道达 400Gbit/s。

笔者先后在北京邮电大学、丹麦技术大学、美国朗讯(Lucent)贝尔实验室、美国佐治亚理工学院、美国 NEC 研究所、中兴通讯美国光波研究所和复旦大学从事高速光传输技术方面的研究。是国家“千人计划”专家、教育部“长江学者奖励计划”特聘教授和国家杰出青年科学基金获得者;发表了 500 余篇学术论文,获得 60 余项美国专利授权。先后担任 Journal of Optical Networking(OSA), Journal of Lightwave Technology (IEEE/OSA), Journal of Optical Communications and Networking(OSA/IEEE) 和 IEEE Photonics Journal 的编委,美国光学学会的会士。

作者迟楠是复旦大学教授,复旦大学通信工程系主任。先后在丹麦技术大学和英国布里斯托大学留学从事高速光通信研究。发表论文 300 余篇,先后在美国光纤通讯展览会及研讨会(OFC)等国际会议做邀请报告 40 余次。

高速光纤通信中数字信号处理算法原理与应用分为两卷。第一卷主要讨论单

载波调制技术,第二卷则主要介绍基于正交平分复用的多载波调制、四维调制和机器学习人工智能等新技术。

本书以笔者和迟楠教授发表的论文及申请的专利为主要内容,包括了笔者部分博士期间发表的论文、专利和实验结果。在本书撰写过程中得到作者指导的学生张俊文博士、李欣颖博士、董泽博士、李凡博士、曹子峥博士、肖江南、王源泉博士、许育铭博士、陈龙博士、王凯辉、孔森、燕方、勾鹏琪、王灿、石蒙和赵明明等在章节撰写和文字校准方面的支持和帮助,特此感谢。

余建军

2017年10月

第一卷目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 国际研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	6
1.3 本书内容和结构安排	8
1.3.1 本书的研究内容和意义	8
1.3.2 本书的结构安排	8
参考文献	12
第 2 章 单载波相干光传输系统基本算法	18
2.1 引言	18
2.2 IQ 不平衡补偿和正交归一化	19
2.3 光纤色度色散补偿	19
2.3.1 色散补偿概述	20
2.3.2 色散补偿基本结构	21
2.3.3 频域均衡算法	22
2.3.4 时域均衡算法	26
2.4 时钟恢复算法	28
2.5 信道动态均衡算法与偏振解复用	29
2.5.1 盲均衡的基本原理	30
2.5.2 经典 CMA 算法	31
2.5.3 针对偏振复用信号的 CMA 算法	34
2.5.4 针对高阶非恒模调制的 CMMA 算法	38
2.5.5 改进级联多模算法	41
2.5.6 独立成分分析	43
2.6 载波恢复算法	49
2.6.1 频率偏移补偿算法	50
2.6.2 基于 V-V 的频偏估计算法	51

2.6.3	基于 FFT 的频偏估计算法	52
2.6.4	基于四次方频偏估计算法	54
2.7	相位补偿算法	57
2.7.1	基于 V-V 的相位补偿算法	57
2.7.2	基于前馈的相位旋转相位补偿	59
2.7.3	修正的 V-V 相偏算法与最大似然相结合的恢复算法	60
2.7.4	盲相位搜索算法及其改进算法	62
2.8	算法演示与总结	65
	参考文献	67
第 3 章	准线性相干光传输系统与数字信号处理	70
3.1	引言	70
3.2	相干光传输系统的理论模型和损伤机理	70
3.3	带限信号时域数字预均衡技术研究	72
3.3.1	基于接收机端自适应均衡器的数字时域预均衡原理	73
3.3.2	相干光通信系统的线性数字预均衡实现方法	75
3.3.3	相干光通信时域数字预均衡仿真结果分析	75
3.3.4	实验结果	83
3.4	小结	89
	参考文献	90
第 4 章	高谱效率超奈奎斯特波分复用系统研究	91
4.1	引言	91
4.2	超奈奎斯特信号多模盲均衡算法	92
4.2.1	多模盲均衡算法的原理	93
4.2.2	多模盲均衡算法的仿真结果分析	96
4.2.3	多模盲均衡算法的实验对比研究	99
4.3	四载波的数字超奈奎斯特信号产生与 400Gbit/s 传输	103
4.3.1	数字超奈奎斯特信号产生的原理	103
4.3.2	四载波 512Gbit/s 的超奈奎斯特 WDM 信号产生 与传输实验	104
4.4	单载波 110Gbaud 的超奈奎斯特滤波信号的 400Gbit/s 传输实验	109
4.4.1	20×440Gbit/s 超奈奎斯特 WDM 长距离传输实验	110
4.4.2	10 信道超奈奎斯特 WDM 信号在 ROADM 链路中的 传输实验	113

4.4.3 基于 128.8Gbaud PDM-QPSK 的单载波 400Gbit/s 信号在陆地光纤链路中的传输实验	117
4.5 小结	123
参考文献	124
第 5 章 全光奈奎斯特信号产生与处理	125
5.1 引言	125
5.2 全光奈奎斯特脉冲产生与信号复用原理	126
5.2.1 高质量 Sinc 型奈奎斯特脉冲产生基本理论	126
5.2.2 全光奈奎斯特信号复用和相干探测的原理	127
5.2.3 基于 MZM 和带通滤波器的全光奈奎斯特脉冲 产生原理	129
5.3 单偏振 125Gbaud 全光奈奎斯特 QPSK 信号的产生与相干探测 实验	130
5.4 偏振复用的全光奈奎斯特信号长距离传输实验	137
5.5 小结	141
参考文献	141
第 6 章 光纤信道非线性补偿算法研究	142
6.1 引言	142
6.2 DBP 光纤非线性补偿算法的原理	142
6.2.1 基于 4×160.8 Gbit/s 波分复用 PDM-QPSK 信号的 非线性补偿实验	144
6.2.2 基于对数步长的改进数字非线性补偿算法	150
6.3 小结	162
参考文献	163
第 7 章 概率整形技术研究	165
7.1 引言	165
7.2 概率整形技术的基本原理	166
7.2.1 概率整形技术的定义和实现方法	166
7.2.2 概率整形技术改善误码性能的原因分析	167
7.2.3 概率整形技术的算法	168
7.3 仿真探究概率整形技术的可行性	169
7.3.1 仿真装置	169
7.3.2 仿真结果及分析	170

7.4	实验探究概率整形技术对 RoF 系统的优化	172
7.4.1	PS-16QAM 与 16QAM 的比较	172
7.4.2	在 40m 无线传输的 RoF 系统中探究 PS 性能	178
7.5	小结	180
	参考文献	181
第 8 章	超高波特率光信号传输技术	183
8.1	引言	183
8.2	110Gbaud 极化复用的 QPSK 信号传输 3 000 千米	184
8.2.1	实验设置	184
8.2.2	实验结果分析	187
8.2.3	多链路系统性能	189
8.3	128Gbaud 极化复用 QPSK 信号传输 1 万千米	193
8.3.1	实验设置	193
8.3.2	实验结果分析	195
8.4	128Gbaud 极化复用的 16QAM 信号长距离传输	197
8.4.1	实验设置	197
8.4.2	实验结果分析	199
8.5	小结	201
	参考文献	202
第 9 章	高阶调制码光信号传输技术	205
9.1	引言	205
9.2	编码开销和带宽限制的权衡	205
9.3	34Gbaud PM-256QAM 信号产生	206
9.4	单载波 400Gbit/s PM-256QAM 信号传输实验	209
9.5	小结	212
	参考文献	212
第 10 章	无载波幅相调制技术	214
10.1	引言	214
10.2	CAP 的调制与解调原理	215
10.2.1	单带 CAP- m QAM 的调制与解调原理	215
10.2.2	多带 CAP 信号的调制与解调原理	217
10.3	多带多阶 CAP 用于 WDM-PON 接入网的研究	219
10.4	CAP-64QAM 在无线接入网的应用	224

10.5	基于 DML 的 60Gbit/s CAP-64QAM 传输实验	228
10.6	100Gbit/s 带电色散补偿的 CAP 长距离传输	231
10.6.1	无载波幅度相位调制的数字信号处理	232
10.6.2	SSB 信号的生成	233
10.6.3	实验装置图和结果	233
10.6.4	基于 DDMZM 的预色散和色散补偿光纤之间的 比较	234
10.6.5	基于 DDMZM 的预色散和 SSB 之间的比较	236
10.6.6	DDMZM 和 IQ 调制器之间的比较	236
10.6.7	结论	238
10.7	小结	238
	参考文献	239
第 11 章	PAM4 信号调制和基于数字信号处理的探测技术	241
11.1	引言	241
11.2	PAM4 调制原理与相关算法	241
11.2.1	PAM4 调制原理	241
11.2.2	DD-LMS 算法	243
11.2.3	预色散补偿原理	244
11.2.4	查找表算法	244
11.3	PAM4 高速传输系统	245
11.3.1	4 通道 IM/DD 112.5Gbit/s PAM4 传输系统	245
11.3.2	50Gbit/s 和 64Gbit/s PAM4 PON 下行传输系统	250
11.3.3	4 通道 IM/DD 112Gbit/s PAM4 预色散补偿传输 系统	252
11.3.4	极化复用的 400Gbit/s PAM4 信号产生和相干探测	256
11.4	小结	263
	参考文献	263

第二卷目录

第 12 章 光 OFDM 原理

第 13 章 直接检测 OFDM 的基本数字信号处理技术

第 14 章 强度调制直接检测高速光纤接入系统

第 15 章 基于 IQ 调制直接检测的高速光纤接入系统

第 16 章 前向纠错码

第 17 章 高谱效率光四维调制基本原理与关键技术

第 18 章 光通信系统中的机器学习算法

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

近十年来,伴随着视频会议、高清互联网电视、云计算、物联网、社交媒体和移动数据传输为代表的新业务和新技术的迅猛发展,通信传输速率和互联网的数据流量一直处于爆炸式增长中,这对作为整个通信系统基础的物理层——光传输网提出了更高的传输性能要求^[1-14]。光纤通信具有极大的宽带传输能力,而我国 97% 以上的信息量是通过光纤传送的,从核心骨干网到城域网、光网络交换节点,再到数据中心光互连、城市光纤接入网甚至光纤无线融合接入网,光纤通信网络已成为国家信息建设的基础设施,以及信息传输和交换不可替代的承载平台^[11-14]。从国际上看,欧美日等主要发达国家均对超宽光传输网技术的发展非常重视。欧盟通过其第七框架计划(FP7)持续关注该领域的研究,并以此为契机推进欧洲大容量传输技术的探索与发展;美国政府积极推行宽带激励计划以实现全美范围内大容量骨干网的建设,同时也将其列为经济刺激计划的重点。在国际高速互联通信方面,由中美日等多国共建的新一代跨太平洋高速海底光缆“FASTER”于 2016 年 6 月底正式投入使用^[15]。该光缆总长 9 000 千米,设计峰值容量高达 60Tbit/s(100Gbit/s×100 波长×6 光纤)。在固定接入网方面,国际电信联盟标准分局(ITU-T)于 2016 年完成了基于时分波分复用技术(T-WDM)的 40Gbit/s 无源光网络(NG-PON2)G. 989. 3 标准制定工作^[16],各大运营商也已进入测试甚至实际部署阶段。在此全球背景下,我国也紧紧把握住超宽带光传输技术更新换代的历史机遇,提出“中国制造 2025”“中国一带一路的互联互通”等国家战略,并将其作为未来国家信息领域发展的重要着眼点。在各因素的驱动下,从物联网、云计算、大数据、移动社交网络到“互联网+”、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)再到人工智能(AI)等,都显示了信息通信技术的重要性。由此可见,宽带高速光传输网已成为全球信息发展战略的重中之重,而研究超高速大容量的光传输基础理论和实现技术已成为当前全球信息领域的迫切需求。

应当认识到,对超高速大容量光传输网络的研究是一个全面而又多层次的技术探索。针对不同的网络传输层次的光纤传输,开展相对应的理论和技术研究非常必要。图 1-1 为超高速光通信网络的结构层次图,纵观传输网络的结构,光纤传输从上到下依次覆盖了核心骨干网、城域光交换网、光纤接入网、数据中心光互连,

以及光纤无线融合移动接入网。不同的网络又具有不同的技术特点和发展需求,核心骨干网需要传输距离大于 1 000~2 000km,跨洋海底光缆甚至要大于 5 000~10 000km。目前商用的核心网已经开始部署 100Gbit/s 每信道(波长),而科研院所已经瞄准 400Gbit/s 甚至 1Tbit/s 每信道的研究工作^[11-14,17-19]。此外,核心骨干传输网还要求容量要大于 1~10Tbit/s,从而实现超高速超大容量和超长距离光传输^[20]。相比较而言,城域网方面则针对的是距离大于 100~500km,传输速率在 40~100Gbit/s 每信道,主要面向的是光网络交换节点的传输网络;容量方面也比核心骨干网要低一些,需要 400G~1Tbit/s 的信道容量。

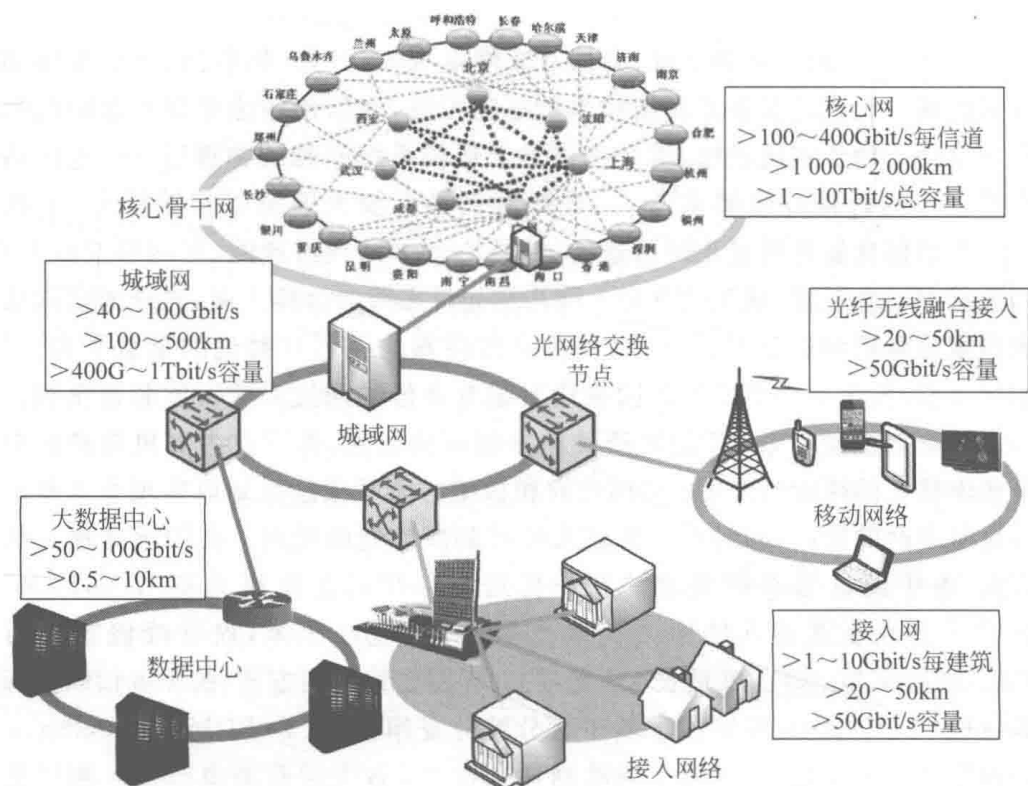


图 1-1 超高速光通信网络的结构层次图

城域网之下,接入网和短距离光传输的带宽需求逐年快速增长^[1-8]。一方面,随着云计算时代的来临和大数据中心的普及,大容量高速率的数据中心逐渐成为新一代互联网服务的基础,迫切需要面向数据中心的短距离高速光互连提供传输支持^[6,7];另一方面,随着用户端数据业务和移动互联的带宽需求不断增加,作为“最后一千米”的光接入网的传输速率也在不断增加^[4,5]。数据中心光互连尽管传输距离短(0.5~10km),但速率要求较高,未来预计需要达到 50~100Gbit/s 的单信道速率。同时,不同于长距离传输的承载网,其技术发展还需要考虑成本、方案复杂度和系统功耗的平衡等问题。考虑到成本、功耗和复杂性,目前强度调制/直接检测(IM/DD)与高阶调制格式相结合是一种较实际的方法。同样的,接入网对

成本、带宽和用户数量的综合考虑也同样十分重要。最后,考虑到光纤传输的有线性,尽管其传输速率高,但无法实现可移动、大范围覆盖,而无线通信具有广泛覆盖性和移动性,是贴近用户使用最为方便的通信方式,特别是在某些特殊灾害场景下,无线通信具有快速覆盖的优势。不过其频段资源、通信带宽和传输距离均有限。为了实现广泛、高速且稳定安全的通信接入,业界也早已开始了对高速光纤无线通信的融合接入网的部署和研究。

综上所述,研究面向整个光通信网络的超高速大容量光通信基础理论和关键技术,针对不同网络层次的应用场景和技术要求,探索理论基础和创新应用技术,具有重要的科研价值和应用前景。本书所研究的超高速大容量光通信系统的若干关键技术,针对核心骨干网实现大容量、超高速和长距离光传输;针对城域网实现高谱效率和全光信号处理;而针对数据中心和接入网等短距离光传输,实现结构简单、低成本的高速光传输和光接入;针对光通信领域其他研究方向及最新热点,介绍了概率整形技术(PS)、前向纠错码(FEC)、四维调制及机器学习等。以上各项研究满足不同场景的技术需求,是国内外研究的热点和重点。

1.2 国内外研究现状

为实现超高速大容量的光传输网络,针对不同层次光传输网,需要研究多种关键的系统理论基础和实现技术,如为实现大容量需要 Tbit/s 甚至 10Tbit/s 的多波长光源,为实现长距离光传输所需的准线性系统和非线性补偿技术,为实现超高速光传输的高谱效率编码与调制技术,还有针对短距离光互连和接入网的新型高效调制格式和信号处理技术,以及高速光无线融合网络,等等。下面将从国际和国内两方面,介绍国内外在不同层次的超高速大容量光传输网络的理论基础和实现技术上的重要研究工作与发展趋势。

1.2.1 国际研究现状

随着数字信号处理技术的迅速发展和日益成熟,为实现超高速大容量信号的长距离光传输,包括针对色散补偿、时钟恢复、信道动态均衡算法、偏振模色散补偿、载波恢复以及相位补偿在内的一系列数字相干算法,均得到了广泛深入的研究和较为系统的发展^[12-14,21-30]。

在色散补偿方面,相比于色散补偿光纤,在相干系统中采用基于数字信号处理的色散补偿算法,实现成本更低且对光纤非线性效应的容忍度更高,因此成为数字信号处理流程中必不可少的一环。2009年和2010年美国 and 英国研究人员相继验证了时域和频域色散补偿算法在相干光通信中的应用^[13,30]。

在时钟恢复方面,德国亚琛(Aachen)技术大学提出的数字平方滤波平方定时估计算法,受限于平方运算计算复杂度高和采样速率要求高等因素,因而在高速传

输系统中的应用有限^[31];加德纳(Gardner)算法在系统中实现简单且对载波相位不敏感,因此应用非常广泛^[32];高达(Godard)算法可以有效控制和避免符号频谱交叠引起的干扰,并且仅需以一倍符号速率采样^[33];穆勒(Muller)算法可以直接通过接收信号的采样值获取对时钟函数的无偏估计^[34]。

在偏振模色散补偿方面,对于高阶调制格式,如16QAM、32QAM,甚至更高阶QAM,诸多文献均给出了适用于这些调制格式的动态均衡算法^[13,24,26,35-37]。值得注意的是,由于恒模(CMA)算法本身的误差函数更新针对恒模均衡算法(QPSK)的单一模,对于高阶调制格式如16QAM等,并不能使误差函数趋于零,因此均衡信道时存在较大的误差。2010年,美国电话电报公司(AT&T)提出了一种针对8QAM、16QAM等高阶QAM结构的级联多模盲均衡算法(CMMA)^[13,37],这种算法根据高阶QAM信号不同的模半径选择最佳的判决值,提高了误差函数的精度,理论上误差函数趋于零;美国贝尔(Bell)实验室也通过实验验证了模半径选择均衡算法(RDE)在16QAM等调制格式中的应用^[38],这种算法在计算误差函数时进行不断地模半径判决,最终选择判决后的模半径作为误差函数计算值。更进一步,改进的级联多模算法(MCMMA)是在星座点的统计规律为方形的调制信号的基础上提出的,它利用星座点分布的统计规律修正了传统的多模算法,将依赖收敛半径的单一误差函数转变成两个正交的误差函数,最终提高均衡器性能^[39]。此外,常用的偏振均衡算法还有独立分量分析算法(ICA)等^[24]。

在载波恢复方面,基于经典维特比(Viterbi-Viterbi)算法^[40]的前馈载波恢复已经在相干光系统中得到广泛应用;2009年,德国帕德博恩(Paderborn)大学提出了一种硬件实现简单且高效的前馈式相位恢复算法,即盲相位搜寻算法(BPS)^[41]。2010年,美国AT&T实验室通过引入最大似然估计算法,提出了一种计算复杂度更低的改进算法^[13,37]。

在非线性和补偿方面,数字后向传播(DBP)被看作是最有前途的一种技术:2009年,美国中佛罗里达大学提出了采用一种DBP技术对信道间的非线性损伤进行补偿的运算负荷^[42];2011年,美国中佛罗里达大学研究人员再次提出了一种改进的分步方法用于极化复用-波分复用(PDM-WDM)系统,一个由马纳科夫(Manakov)方程所推导出的耦合系统的非线性偏微分方程被用在DBP技术的计算过程中^[43];2012年,日本电气公司美国实验室(NEC)提出了一种色散折叠的DBP技术,用来减少在进行非线性补偿时产生的庞大的计算量^[44]。

随着波分复用系统(WDM)的广泛应用,考虑到有限的可用带宽,高频谱效率光传输是大容量光通信系统的关键^[15,17,26,36,45-57]。一方面,高频谱效率光传输可以通过高阶调制格式实现,如2010年日本电报电话公司(NTT)实现了100波特120Gbit/s的偏振复用64QAM信号传输160km^[36];2011年,美国AT&T实验室实现了64Tbit/s的谱效率高达6bit/s/Hz的64QAM传输320km^[46];2012年,日本东京大学率先实现了60Gbit/s的1024QAM相干光传输^[26],然而由于高阶调制

格式所需的信噪比很高,传输距离非常有限,难以适应长距离传输的要求^[36];自2016年9月以来,概率整形(PS)技术作为高阶调制格式优化技术凭借其传输容量高、复杂度低的优势受到关注。2016年,欧洲光通讯展览会(ECOC)会议文章中诺基亚贝尔实验室等在德国骨干网中通过四载波超频道的1Tbit/s数据传输,利用概率整形技术,实现了前所未有的传输容量和频谱效率^[58]。同年10月,阿尔卡特朗讯和阿尔卡特朗讯诺基亚贝尔实验室用概率整形技术实现了6600km单模光纤65Tbit/s的数据传输^[59]。另一方面,近些年来所提出的频谱压缩技术,在不致增加过多系统设备和增加过多信噪比需求的基础上提高原有系统谱效率,已成为国内外研究的热点^[15,17,47-57]。1990年前后,研究人员提出了常规WDM(符号带宽小于信道间距)^[60],2010年,意大利研究人员首次提出了奈奎斯特(Nyquist)WDM(符号带宽等于信道间距)在光通信里面的应用^[61];2011年,美国泰科(Tyco)公司首次提出了压缩频谱实现超奈奎斯特WDM(符号带宽小于信道间距)的可能^[51]。常规WDM方案中,信道之间有防护频带,因此可消除信道串扰与符号间干扰。但是,在超奈奎斯特系统中,正是由于滤波效应,系统性能受到噪声、信道间串扰和符号间干扰等影响而严重降低^[47-51,57]。因此,为了在包括FEC开销的长距离传输中解决噪声、串扰和符号间干扰等问题,并实现更高的频谱效率,新型的数字信号处理和恢复算法是亟待解决的核心问题^[15,17,47,52,56]。

在正交复用方面,迄今为止,高阶调制格式的相干光正交频分复用(OFDM)已经被广泛研究,基于电的和全光的OFDM信号产生都有报道,尤其是全光OFDM,2011年德国卡尔斯鲁厄理工学院(KIT)在Nature Photonics上报道了基于16QAM和相干探测,26Tbit/s线速率的超级信道全光OFDM传输系统^[62]。与OFDM相比,2010年,意大利研究人员首次提出证实了奈奎斯特信号传输有几个独特的优点,包括低接收机复杂度、低接收机带宽,以及改善光纤非线性损伤的低峰均比^[63]。高谱效率大传输容量的方案也已经被报道。同样是德国KIT研究所,于2012年采用12.5Gbaud PDM-16QAM和325个光载波的单光源32.5Tbit/s奈奎斯特WDM传输,并以截稿日期后接收的文章的形式发表在当年的美国光纤通讯展览会及研讨会(OFC)上^[64]。高质量Sinc型奈奎斯特脉冲的全光方案可以由线性相位且频率锁定的光梳产生,此方案最早于2013年由瑞士和德国科学家在Nature Communication上提出^[65]。

不同于长距离传输的承载网,短距离与接入网的光传输需要考虑成本、方案复杂度和系统功耗等问题,因而短距离传输一般是直调直检的系统。国际上已经有多家研究所和企业对数据中心这种短距离光互连开展了大量的研究^[1-8]。2014年,日本NTT光学实验室使用光学组件和循环阵列波导光栅,实现了400Gbit/s的大容量光纤传输。2013年,丹麦科学技术大学在O波段采用4路多边带无载波幅相调制(CAP)调制技术,实现了客户端的400Gbit/s数据传输,并且基于垂直腔面发射激光器(VCSEL)实现了速率100Gbit/s的100m多模光纤传输^[6]。2014

年,贝尔实验室使用新型的接收机电路,不使用均衡技术和数字信号处理,实现了传输速率为 100Gbit/s 的开关键控(OOK)信号在标准单模光纤中的 1km 传输^[66]。2012 年,剑桥大学研究人员重点研究了 CAP 技术并指出,CAP 具有低功耗和低成本的优点,相比于其他调制格式,如非归零码(NRZ)和 OFDM 等,CAP 用于短距离光传输具有巨大的潜力^[4]。而脉冲幅度调制(PAM)同样因其简单和低成本受到关注。2016 年,OFC 会议上 Jia 提出了一种设计简单的查找表(LUT)预畸变的非线性补偿方法^[67]。

1.2.2 国内研究现状

我国在超高速大容量光通信方面的研究仍处于发展阶段,目前尚处于理论研究和基础实验阶段,离国外一流研究水平还有一段距离。然而,也应当看到,在国家科研计划如“973”“863”和国家自然科学基金的支持下,国内已有不少单位开展了相关研究,复旦大学、清华大学、北京邮电大学、北京大学、湖南大学、上海交通大学、华中科技大学、武汉邮电科学研究院等高校和研究所都在这些方面开展了不少工作,而华为、中兴通讯、烽火科技等高科技光通信企业也做了大量的产业化实践。

在科技部支持的“973”项目——“超高速超大容量超长距离光传输基础研究(2010CB328300)”就涉及了关于超高速超大容量光传输高谱效率极限的理论研究,在该项目的资助下,复旦大学于 2011 年实现了创纪录的 178 条全 C 波段多载波产生^[68],并于 2012 至 2013 年相继提出了多种多载波产生结构,面向 Tbit/s 和 10Tbit/s 的多载波信道^[69-71]。在多维多阶调制格式方面,2011 年,中兴通讯实现了单信道超过 1Tbit/s 的 7 路 PDM-64QAM 光信号在 320km 光纤上的传输^[10]。2012 年,复旦大学与中兴通讯通过产学研方式合作实现了 30Tbit/s (3×12.84 Tbit/s)的 PDM-64QAM 光信号在 320km 光纤上的传输^[9]。2014 年,武汉邮电科学研究院实现了 63Tbit/s 的 C+L 波段的全波段 PDM-16QAM 信号传输试验^[72]。在开展基于光实时数字相干接收的光传输技术的研究方面,2011 年 12 月 5 日,武汉邮电科学研究院在国家重点实验室,成功实现 240Gbit/s OFDM 信号在普通单模光纤上无误码实时传输 48km,这是国际上首个用在线实时处理方式上实现的超 100Gbit/s 超高速光通信传输试验^[73]。2014 年,中兴通讯与湖南大学等合作,实现了双边带 100Gbit/s 的 16QAM-OFDM 信号的实时产生与传输。频谱压缩方面,2014 年华东科技大学实现了基于偏移 16QAM 的奈奎斯特波分复用传输和接收^[74]。超高速信号全光奈奎斯特信号产生方面,复旦大学于 2014 年率先实现了完整意义上的全光奈奎斯特信号的产生与相干探测,该项成果利用全光梳状谱,成功实现世界上首个真正意义上的全光奈奎斯特信号相干通信系统,成功产生并相干探测了高达 125Gbaud 的全光奈奎斯特 QPSK 信号。该项成果同时也是目前单载波单个接收机探测的最高波特率纪录。这一重要成果的首次成功实现,对未来超高速光传输网络、全光信号处理具有重要的研究意义,成果发表在