



信息通信领域产学研合作特色期刊 | 十佳皖刊  
第三届全国期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN

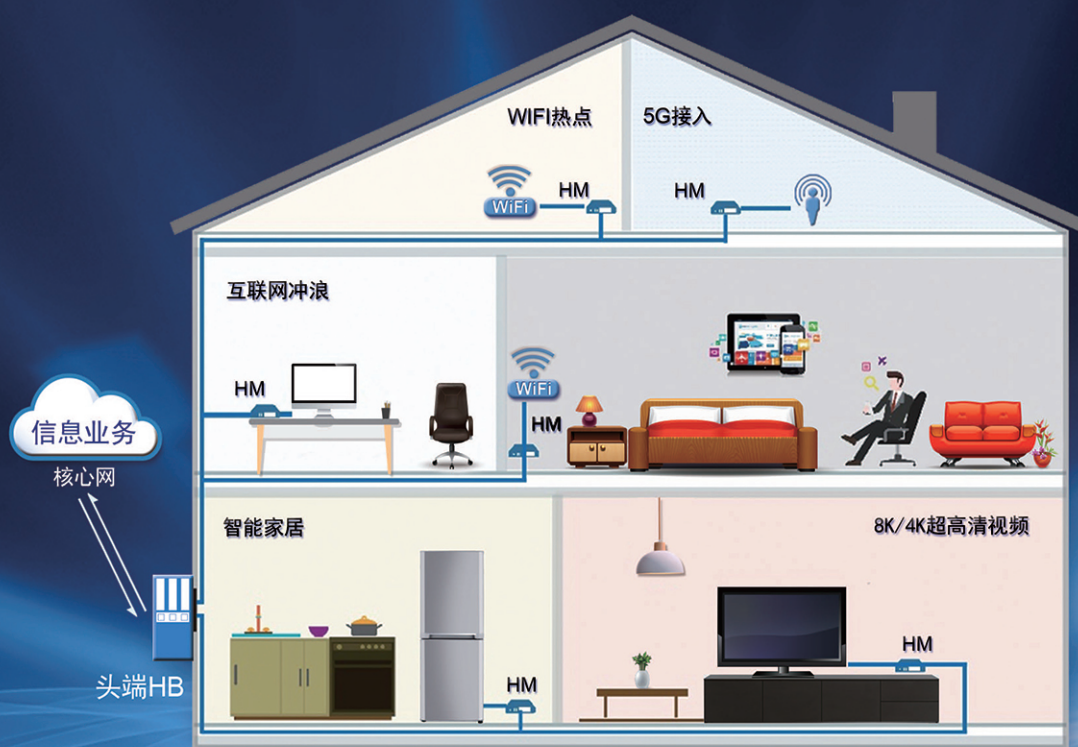
# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2019年10月·第5期

### 专题：新型光互连与光接入技术



# 《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

**顾问** 侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） | 钟义信（北京邮电大学教授） | 陈锡生（南京邮电大学教授）

**主任** 陆建华（中国科学院院士）

**副主任** 徐子阳（中兴通讯股份有限公司总裁） | 糜正琨（南京邮电大学教授）

## 编委（按姓名拼音排序）

<b>陈建平</b>	上海交通大学教授	<b>唐雄燕</b>	中国联通网络技术研究院首席专家
<b>陈前斌</b>	重庆邮电大学副校长	<b>陶小峰</b>	北京邮电大学教授
<b>葛建华</b>	西安电子科技大学教授	<b>王文博</b>	北京邮电大学副校长
<b>管海兵</b>	上海交通大学教授	<b>王文东</b>	北京邮电大学教授
<b>郭庆</b>	哈尔滨工业大学教授	<b>王喜瑜</b>	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
<b>洪波</b>	中兴发展股份有限公司总裁	<b>王翔</b>	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
<b>洪伟</b>	东南大学教授	<b>卫国</b>	中国科学技术大学教授
<b>黄宇红</b>	中国移动研究院副院长	<b>吴春明</b>	浙江大学教授
<b>纪越峰</b>	北京邮电大学教授	<b>邬贺铨</b>	中国工程院院士
<b>江涛</b>	华中科技大学教授	<b>肖甫</b>	南京邮电大学教授
<b>蒋林涛</b>	中国信息通信研究院科技委主任	<b>解冲锋</b>	中国电信北京研究院IP与未来网络研究室主任
<b>李尔平</b>	浙江大学教授	<b>徐安士</b>	北京大学教授
<b>李红滨</b>	北京大学教授	<b>徐子阳</b>	中兴通讯股份有限公司总裁
<b>李厚强</b>	中国科学技术大学教授	<b>续合元</b>	中国信息通信研究院副总工
<b>李建东</b>	合肥工业大学副校长	<b>薛向阳</b>	复旦大学教授
<b>李军</b>	清华大学教授	<b>薛一波</b>	清华大学教授
<b>李乐民</b>	中国工程院院士	<b>杨义先</b>	北京邮电大学教授
<b>李融林</b>	华南理工大学教授	<b>杨震</b>	原南京邮电大学校长
<b>李少谦</b>	电子科技大学教授	<b>叶茂</b>	电子科技大学教授
<b>林晓东</b>	中兴通讯股份有限公司副总裁	<b>易芝玲</b>	中国移动研究院首席科学家
<b>刘健</b>	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	<b>张宏科</b>	北京交通大学教授
<b>刘建伟</b>	北京航空航天大学教授	<b>张平</b>	北京邮电大学教授
<b>陆建华</b>	中国科学院院士	<b>张卫</b>	复旦大学教授
<b>马建国</b>	广东工业大学教授	<b>张云勇</b>	中国联通研究院院长
<b>孟洛明</b>	北京邮电大学教授	<b>赵慧玲</b>	工业和信息化部科技委信息网络专家组组长
<b>糜正琨</b>	南京邮电大学教授	<b>郑纬民</b>	清华大学教授
<b>任品毅</b>	西安交通大学教授	<b>钟章队</b>	北京交通大学教授
<b>石光明</b>	西安电子科技大学副校长	<b>周亮</b>	南京邮电大学教授
<b>孙知信</b>	南京邮电大学教授	<b>朱近康</b>	中国科学技术大学教授
<b>谈振辉</b>	北京交通大学教授	<b>祝宁华</b>	中国科学院半导体研究所副所长

# 《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

### 1. 投稿约定

- (1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台:tech.zte.com.cn/submission,并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2)编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

### 2. 内容和格式要求

- (1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2)稿件需采用WORD文档格式。
- (3)稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位,中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。
- (4)中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,以150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6)文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8)所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:
  - 期刊[序号]作者.题名[J].刊名,出版年,卷号(期号):引文页码.数字对象唯一标识符
  - 书籍[序号]作者.书名[M].出版地:出版者,出版年:引文页码.数字对象唯一标识符
  - 论文集中析出文献[序号]作者.题名[C]/论文集编者.论文集名(会议名).出版地:出版者,出版年(开会年):引文页码.数字对象唯一标识符
  - 学位论文[序号]作者.题名[D].学位授予单位所在城市名:学位授予单位,授予年份.数字对象唯一标识符
  - 专利[序号]专利所有者.专利题名:专利号[P].出版日期.数字对象唯一标识符
  - 国际、国家标准[序号]标准名称:标准编号[S].出版地:出版者,出版年.数字对象唯一标识符
- (9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100kB)。
- (11)应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12)提供联系方式,如:通讯地址、电话(含手机)、Email等。

### 3. 其他事项

- (1)请勿一稿两投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号凯旋大厦1201室,邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356,联系邮箱:magazine@zte.com.cn

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台:tech.zte.com.cn/submission

# 目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)  
总第148期 第25卷 第5期 2019年10月

## 专题:新型光互连与光接入技术

数据中心高速光互连技术 02  
余建军

光接入网高灵敏度低成本相干通信技术 09  
唐明, 李伟昊, 冯振华

面向数据中心光互连的高速光传输技术 17  
张帆, 朱逸萧

数据中心中光交换技术研究的现状与挑战 25  
郭秉礼, 黄善国

面向移动前传的大容量光接入网技术 31  
李隆胜, 胡卫生

新型消费类电子光互连应用 38  
黄君彬

面向多场景应用的新型光纤同轴混合接入技术 44  
赵辉, 刘跃, 张诚

51 下一代光接入网的核心光电芯片技术  
陈雷

## 专家论坛

56 高速可见光通信技术的挑战与展望  
迟楠, 胡昉辰, 周盈君

## 企业视界

62 5G 确定性网络的应用和传送技术  
赵福川, 刘爱华, 周华东

## 技术广角

68 新型硅基集成光隔离器的研究进展  
李明轩, 于丽娟, 刘建国

## 综合信息

24 《中兴通讯技术》2020年专题计划

55 中兴通讯技术杂志社第24次编委会议隆重召开

## 2019年第1—6期专题计划及策划人

### 1. 5G 商用支撑理论及关键技术

中兴通讯股份有限公司执行副总裁 王喜瑜  
中兴通讯股份有限公司首席科学家 向际鹰

### 2. 云网一体化技术

中国联通网络技术研究院首席科学家 唐雄燕

### 3. 边缘计算技术及其应用

清华大学教授 郑伟民  
乔治亚州立大学教授 潘毅  
韦恩州立大学教授 施巍松

### 4. 5G 通信安全技术

清华大学教授 李军

### 5. 新型光互连与光接入技术

北京大学教授 李红滨  
北京大学副教授 杨川川

### 6. 5G 通信系统示范应用

中国信息通信研究院科技委主任 蒋林涛

# CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 25 No. 5 Oct. 2019

## Special Topic:

### New Technologies of Optical Interconnection and Optical Access

- Technologies for High-Speed Data Center Interconnection **02**  
YU Jianjun
- High-Sensitivity and Low-Cost Coherent Communication Technology for Optical Access Network **09**  
TANG Ming, LI Weihao, FENG Zhenhua
- High-Speed Transmission Technologies for Data Center Optical Interconnection **17**  
ZHANG Fan, ZHU Yixiao
- Optical Switching for Data Center: Current Status and Challenging **25**  
GUO Bingli, HUANG Shanguo
- Emerging Technologies of High Capacity Optical Access Network for Mobile Fronthaul **31**  
LI Longsheng, HU Weisheng
- Optical Interconnect Technology in Consumer Electronics Markets **38**  
HUANG Junbin

- 44** The Hybrid Fiber Coaxial Access Technology for Multi-Application Scenarios  
ZHAO Hui, LIU Yue, ZHANG Cheng

- 51** Core Optoelectronic Chip Technology for Next Generation Optical Access Network  
CHEN Lei

## Expert Forum

- 56** The Challenges and Prospects of High-Speed Visible Light Communication Technology  
CHI Nan, HU Fangchen, ZHOU Yingjun

## Enterprise View

- 62** Applications and Transmission Technology of 5G Deterministic Network  
ZHAO Fuchuan, LIU Aihua, ZHOU Huadong

## Technology Perspective

- 68** Research Progress of New Silicon-Based Integrated Optical Isolators  
LI Mingxuan, YU Lijuan, LIU Jianguo

期刊基本参数: CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*76\*zh\*P\* ¥ 20.00\*15000\*11\*2019-10

## 敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

# 专题：新型光互连与光接入技术

专题策划人 李红滨



北京大学教授、博士生导师，国务院  
三网融合专家组成员，国家“863”计  
划“高可信网络”专项总体组组长，  
中国通信学会常务理事，广电总局  
科技委特邀委员；长期从事通信网  
和光通信研究工作；主持并完成 10

余项国家“863”项目，部分成果达到国际先进水平；获国家科技进步二等奖 2 次、电子部科技进步一等奖 1 次。

专题策划人 杨川川



北京大学副教授、IEEE 高级会员、《IET  
Communications》杂志副编辑；长期从事超  
高速光通信系统、大容量无源光网络以及  
短距离光互连系统关键技术研究；主持国  
家重点研发计划、教育部联合基金青年人  
才项目、国家国际科技合作专项项目、国家自然科学基金项目、中兴通讯股份有限公司等企业技术开发项目；  
获 2017 年中国通信学会科学技术二等奖；发表学术论文  
70 余篇。

## 内容导读

近年来，随着云计算、移动互联、虚拟现实等新型宽带业务的发展，大数据时代数据容量的增长逐渐从超长距离传输的核心网向中短距离城域网以及数据中心、超算中心转移。支撑数据中心、超算中心的光互连技术以及用于中短距离城域网的光接入技术是网络及通信领域的研究热点。

在以云服务和应用为主导的时代，数据中心贡献了大部分全球互联网协议流量。根据思科全球云指数预测，到 2021 年底，全球数据中心年流量将增长到 20.6 ZB。面对这一发展趋势，数据中心传输速率正在从 10/40 Gbit/s 朝着 25/100/400 Gbit/s 架构升级。本期专题文章探讨了更高容量和性能的光互连技术，旨在实现超大容量密度、低成本、低时延和低能耗数据传输，这是实现高性能计算的关键；还介绍了光互连在新型消费类电子市场，如高清多媒体接口（HDMI）、通用串行总线（USB）、专业音视频以及分体式电视领域的新应用。光互连有源光缆以其低成本生产技术、小体积、支持多路光通道集成的特点，在 2018 年以来迅速得到了市场的认可。

中国已经是全球光接入用户数量最多的国家。在市场规模效应的驱动下，近些年来中国的光接入网产业及技术都进入了快速发展的轨道。下一代光接入网设备应该满足更大覆盖范围、超大容量、

更多接入类型的发展需求。针对这一需求，本期专题文章探讨了符合光接入网长期演进的新型光接入系统、用于超密集光接入网的高灵敏度低成本相干检测技术、非线性串扰抑制方法、相干信号实时接收技术、超密集波分复用相干收发技术等；涉及了适应下一代光分配网络的大容量无线前传新型架构、新的接口规范及大容量低时延弹性智能的光与无线融合等关键技术；还介绍了光接入局端和用户侧设备关键技术。同轴电缆网络是中国信息基础设施的重要组成部分，具备传输容量大、入户率高、室内接口广泛等优势，本专题对这一领域也进行了探讨。

本期专题中，我们邀请长期从事光互连与光接入技术研究的一批专家、学者撰写了系列文章。这些文章凝聚了各位作者的研究成果和工作经验，希望能给读者带来有益的收获与参考。在此，对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢！

李红滨、杨川川

2019 年 9 月 25 日

# 数据中心高速光互连技术

## Technologies for High-Speed Data Center Interconnection

余建军/YU Jianjun

(中兴通讯股份有限公司德州分公司, 美国 新泽西 07960)  
(ZTE TX Inc, New Jersey 07960, USA)



**摘要:** 随着网络流量的爆发性增长, 数据中心传输速率将从 10/40 Gbit/s 朝 25/100/400 Gbit/s 架构升级。这些速率的提升需要有新的信号光源、调制和探测技术满足其要求。将介绍这些技术在数据中心应用的最新研究成果。

**关键词:** 数据中心; 光互连; 调制格式; 相干探测

**Abstract:** Driven by fast growing Internet traffic, the bit rate between data center is upgraded to be from 10/40 Gbit/s to 25/100/400 Gbit/s. These high-speed signals will need new optical transmitter source, modulation formats and detection technologies. These technologies and the latest research results are introduced in this paper.

**Key words:** data center; interconnection; modulation formats; coherent detection

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20191010.1046.002.html>

网络出版日期: 2019-10-10

收稿日期: 2019-07-25

### 1 数据中光互连速率增长迅速

随着物联网、人工智能(AI)和虚拟现实(VR)的涌现, 互联网已经到了一个新的发展阶段, 所产生的数据量也正在以指数级爆发性地增长, 对通信带宽和计算能力也提出了新的需求。大数据是这个时代的显著特征之一, 作为信息资产, 大数据正在越来越多的领域中发挥着重要作用。为了应对大数据时代的信息处理需要, 云计算成为了必不可少的选项。云计算是一种基于互联网的计算方式, 通过这种方式, 共享的软硬件资源和信息

可以提供给其他计算机和设备。依托云计算的分布式处理、分布式数据库和云存储、虚拟化技术, 原来难以在单台计算机上处理的大数据可以得到充分的挖掘和利用。数据中心是云计算的基础设施, 为云计算提供了支撑平台。根据《Cisco 全球云计算指数白皮书》的预测, 从 2016 年到 2021 年, 全球数据中心的 IP 流量将会以 25% 的年增长率从 6.8 ZB 迅速增长到 20.6 ZB, 如图 1 所示; 到 2019 年, 99% 的全球通信网络流量都是和数据中心有关的, 而大多数的流量发生于数据中心内部, 如图 2 所示<sup>[1]</sup>。

由于网络流量的爆发性增长, 现有的数据中心无论是在传输带宽、传输速率还是时延、可扩展性等方面均无法满足要求, 因此未来的数据中心将从 10/40 Gbit/s 朝 25/100/400 Gbit/s 的架构升级。在这种情况下, 传统的电互连架构面临着传输带宽不足、通信距离有限、网络复杂性过高、能耗过大等挑战, 难以满足未来数据中心的需求, 这就为光互连带来了巨大的机遇。从 1966 年高锟发现了光纤用于通信的潜在可能性以来, 光纤通信技术已经发展了 50 多年。第一个商用光纤通信系统由 AT&T 在 1977 年开

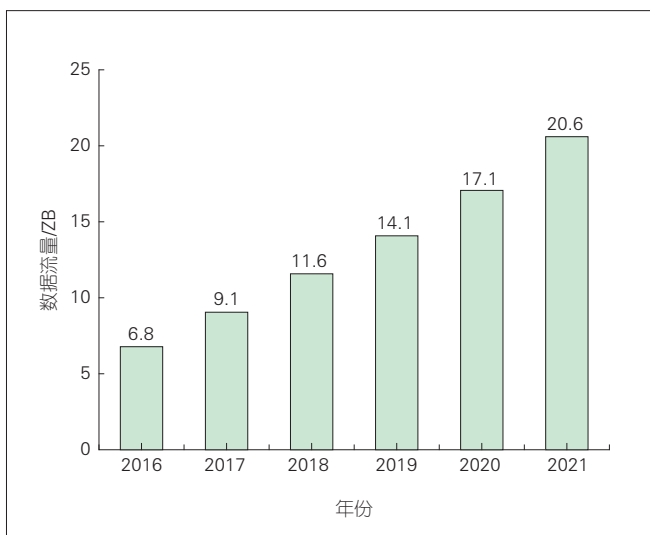


图1  
2016—2021年全球数据中心流量增长趋势

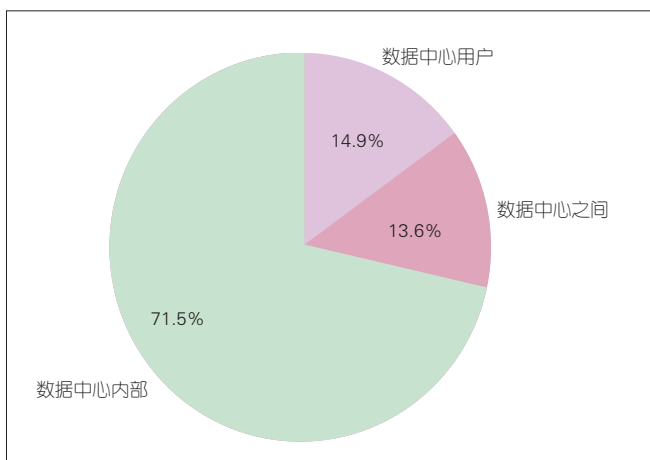


图2  
2019年全球数据中心网络流量分布

发出来的,容量为45 Mbit/s,到了今天单模光纤的容量已经可以达到100 Tbit/s,传输距离跨越了1万多千米,覆盖了大多数的信息传输场景,成为了当今信息社会的基石。

数据中心可以看作是规模庞大的超级并行计算设备,它由成千上万台服务器以网络连接的方式组合而成。一般来说,数据中心互连网络(DCN)采用树状拓扑分层结构,每个机架的服务器集群与机架顶端(ToR)交换机互联,ToR交换机则与汇聚层交换机相连,汇聚层交换机

再与核心交换机连接,从而形成一个庞大的数据中心服务器网络。服务器之间的通信需要超高速率和超低延迟,由于具有大容量、低时延、长距离传输和低功耗的优势,光纤传输已经成为了数据中心互联方案的重要发展方向。在今天的数据中心网络架构中,几乎所有的交换机和路由器连接都采用了光互连,机柜顶端的交换机与服务器也使用了有源光缆(AOC)进行连接。目前大多数的数据中心传输速率已经达到了40 Gbit/s,100 Gbit/s的架构正在

部署,而下一代架构也将会跳过200 Gbit/s,直接升级到400 Gbit/s的速率。并行光传输是数据中心内部通信的重要方式,这种传输方式不仅能够大大提高通信速率,而且能够与大规模网络架构中的并行数据通道结构结合在一起,使得数据处理的速度也有很大的提升。在40 G的架构中,通常采用的是多模传输方案,使用垂直腔面激光器(VCSEL)作为发射源,多模光纤(MMF)作为传输介质,这种方案不仅具有低成本、低功耗的优势,而且易于实现电信号与光信号的速率匹配;对于升级到100 G及更高速率的架构,由于多模光纤传输距离的限制和模式色散的影响,基于VCSEL-MMF的方案难以突破速率的瓶颈,因此主要采用单模光纤(SMF),同时广泛地采用波分复用(WDM)技术。目前的100 G传输技术主要包括3种类型:并行单模4通道(PSM4)、粗波分复用系统(CWDM4),以及短距离光模块(SR4),这几种类型都是4个通道,每个通道25 Gbit/s,其中前2种是基于分布式反馈(DFB)激光器和单模光纤的技术,SR4仍然采用VCSEL和多模光纤<sup>[2-6]</sup>。

对于下一代400 Gbit/s的速率标准,需要对光电器件的带宽提出更高的要求,同时需要新的技术应用于光互连中。这些新的技术包括先进的信号调制技术、色散补偿等,也包括并行多通道技术的演进。从实现方式上看,可以通过提高通道速率、增加并行光纤数目和增加波长通道数的方法来提高现有网络的

容量,使之达到400 Gbit/s的标准,但无论采用哪种方式,400 Gbit/s的单位比特成本和功耗都不应该高于100 Gbit/s。电气和电子工程师协会(IEEE)于2017年12月完成了400 G以太网标准化,但在此之前业界已经进行了一系列的技术研发。400 G升级目前存在着2个主要的挑战,一个是100 G到400 G的4倍速率提升该以何种方式实现,另一个是信号编码的方式从不归零码(NRZ)到4电平脉冲幅度调制(PAM4)带来的信号完整性问题。目前支持数据中心400 G的传输技术有多模的SR4.2和单模的长距离光模块(DR4),其中SR4.2采用4对多模光纤,较为适合100 m以内的传输,而DR4则可以达到500 m,采用8×50 Gbit/s的PAM4。

数据中心内部网络承载了大部分的网络流量,在数据中心服务器上部署的应用程序大多数都使用了并行计算架构,分布式计算节点和存储节点之间存在着大批量的数据吞吐,服务器之间的通信异常频繁;与此同时,高性能服务器已经具有了支持10 Gbit/s速率的数据接口。当这些服务器协同工作时,需要的交换机接口速率很轻易就能超过100 Gbit/s。因此,提升数据中心内部网络的传输能力是一件迫在眉睫的事情,同时也成为了近期学术界和工业界相关研究团队的一个研究热点。

与长距离光纤传输网络不同,数据中心内部网络通常是光纤密集、传输距离从几米到几十千米的短程通信网络,信号的损耗较小,因

此主要使用强度调制-直接检测(IM-DD),能够降低复杂度、功耗和成本,提升系统的集成度。在其他国家的研究中,2011年IBM沃森研究中心基于VCSEL激光器在多芯多模光纤上实现6通道120 Gbit/s的传输,传输距离达到了100 m<sup>[7]</sup>,首次实现多模光纤超过100 Gbit/s速率的传输;同年查尔姆斯理工大学完成了基于VCSEL的PAM4信号传输实验,工作波长为850 nm,在30 Gbit/s的速率下传输了200 m多模光纤<sup>[8]</sup>;2014年,菲尼萨公司(Finisar)使用了25 GHz带宽的VCSEL传输了离散多音频(Discrete Multi-tone)调制的信号,在200 m光模式3(OM3)多模光纤上达到了56 Gbit/s的速率<sup>[9]</sup>;2015年康普公司(Commscope)实现了4×28 Gbit/s的WDM信号在多模光纤上传输100 m的距离<sup>[10]</sup>,该系统同样使用了VCSEL激光器,工作在850~980 nm的波长范围内;2014年,以色列研究人员使用了工作在1310 nm和1550 nm的马赫-曾德尔调制器(MZM)实现了PAM4信号在单模光纤上的传输<sup>[11]</sup>,通过简化的最大似然序列估计(MLSE)算法来消除码间干扰(ISI)和非线性失真,该系统可达到56 Gbaud的速率,其比率为112 Gbit/s,传输距离为2~80 km;2016年,丹麦技术大学使用了MZM在1544 nm的波长上实现了PAM4和离散多音调制(DMT)调制信号传输<sup>[12]</sup>,其中残留边带(VSB)DMT信号在无色散补偿的情况下传输了80 km单模光纤,速率可达56 Gbit/s。

在中国,已经有多家企业和高校对短距离的数据中心光通信展开了研究,并取得了一系列进展。中兴通讯基于10 GHz带宽的分布式反馈激光器(DFB),在无色散补偿和预均衡的情况下实现了56 Gbit/s的单模光纤10 km传输<sup>[13]</sup>;2016年,中兴通讯和复旦大学联合团队进行了4×128 Gbit/s的基于傅里叶变换扩展的(DFT-S)正交频分复用(OFDM)信号传输实验<sup>[14]</sup>,在单模光纤上的传输距离达到了320 km,创造了IM-DD系统在超100 Gbit/s速率上的传输距离记录;同年,该团队基于独立单边带(ISB)技术实现了单波长240 Gbit/s的DFT-S OFDM信号传输<sup>[15]</sup>,传输距离达160 km,创造了IM-DD系统在该距离上的传输速率记录;2017年,北京大学基于18 GHz带宽的VCSEL和多模光纤链路实现了70 Gbit/s的数据传输,通过使用前馈均衡(FFE)与MLSE抑制了激光器带宽不足造成的码间串扰<sup>[16]</sup>;2018年,中兴通讯和复旦大学实现了单波长112 Gbit/s的无载波幅度相位调制(CAP)信号在480 km单模光纤上的传输<sup>[17]</sup>,这是超100 Gbit/s的CAP-16信号在IM-DD系统上的最远传输距离的记录。

在商用发展方面,以百度和阿里巴巴为代表的中国互联网运营商在数据中心光互连架构的部署上和应用上处于领跑地位。2017年百度数据中心的交换机连接采用了基于4通道小型可插拔(QSFP)28 SR4和CWDM4模块,速率为100 Gbit/s,服务器与交换机采用25 G有源光

缆 SFP28 连接。2017 年,阿里的服务器规模部署 25 G AOC SFP28 连接;2019 年开始尝试 100 G 模块,使用 SFP-双密度(DD)和 100 G AOC 线缆的方案,以 2 个 50 G 通道提供了 100 G 的接入能力;而交换机的互连早在 2013 年就部署了 QSFP+ 40 G 的光模块,2017 年规模部署了 QSFP 的 100 G 的光模块,2019 年则开始尝试 QSFP-DD 的 400 G 的光模块,以 8×50 Gbit/s 的 8 通道方式提供了 400 Gbit/s 的接口速率。

## 2 需要新的信号光源、调制和探测技术满足带宽需求

### 2.1 信号光源

数据中心光传输系统与长距离光传输系统不同,由于短距离网络的大规模部署,对成本非常敏感。因此,低成本的光收发器以及强度调制和直接检测已被采纳为主流技术。在 IM-DD 系统中,直接调制激光器(DML)、电吸收调制激光器(EML)和 MZM 是发射机的主要选择。其中,DML 具有体积小、输出功率高、功耗低等优势,用作数据中心光互连发射机可以降低部署成本。但是,DML 在高速直接调制过程中会有很强的啁啾,导致信号光谱变宽,使得信号在传输过程中更容易受到光纤色散的影响。通常采用光滤波和 DML 组成啁啾管理激光器(CML)实现对直调信号的啁啾抑制,从而增加输出光信号的消光比,延长光纤传输距离。在数据中心光互连中,接收光功率灵敏度是考核系统的重要指标,较高的接收

灵敏度通常需要提高进入光纤的光功率。但当入纤光功率较高时,光线中的非线性效应会导致信号畸变,系统性能会下降。基于 DML 的直接调制信号的载波直流分量较低,基于 EML 和 MZM 的外调制信号光谱具有较强的载波直流分量,外调制信号可以承受的入纤功率低于直接调制信号;因此,DML 具有较高的光接收灵敏度。此外,随着数字信号处理(DSP)技术的发展,为了解决调制带宽限制和调制过程中的非线性损伤问题,许多 DSP 方法被提出用以解决这 2 种限制,例如判决反馈均衡、非线性 Volterra 均衡和查找表(LUT)预畸变等非线性补偿方案。

近年来,高速率、低功耗和小尺寸的全硅基电光调制器受到全球广泛研究,它的应用与成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,便于实现光子、光电子集成。超过 100 G 的高速硅光调制器已经有实验报道。北京大学在 2019 年光纤通信博览会及研讨会(OFC2019)报告了基于马赫-曾德尔结构的传统硅光调制器<sup>[18]</sup>,结合先进 DSP 技术,实现了创纪录的 200 Gbit/s (PAM4)和 176 Gbit/s (PAM4)传输 1 千米标准单模光纤;加拿大拉瓦尔大学在 OFC2019 报告了基于行波电极的两个 MZM 全硅 I/Q 调制器<sup>[19]</sup>,采用先进的 DSP 技术,实现了 100 Gbaud 32 正交振幅调制(QAM)相干接收,传输净速率高达单偏振 416.7 Gbit/s。基于硅材料的电光调制器,有望在大容量、大带宽、低成本的数据中心光互连技术的相关方

面发挥着重要的作用。

### 2.2 信号调制

在数据中心高速光互连中,研究先进调制码信号的产生、探测和恢复,可以实现更高频谱效率、更高系统容量。传统的二进制强度调制(OOK)是最简单的调制格式,每个传输符号携带 1 bit 信息;但随着数据传输速率的提高,其对器件的带宽要求以及对光纤色散匹配的要求也越来越高,已经不再适应发展的需要。随着光电器件不断发展,多种高价的调制码方案被提出。其中,主流的调制码有脉 PAM、CAP 和 DMT。

(1)PAM 技术。PAM4 通过 4 电平幅度调制,每个电平值可以承载 2 bit 信息,电平从低到高代表 00、01、10、11。PAM4 格式对系统带宽的要求比 OOK 降低一半,对色散的容忍性可以比 OOK 提高 4 倍,相比于 DMT 和 CAP 等高级调制格式,结构简单、易于实施,是目前受到推崇的调制格式。

(2)CAP 技术。在发射端,原始数据比特序列首先被映射成复数符号,然后将映射后的符号上采样,以匹配后续的整形滤波器的采样速率。数据上采样后,通过一对正交的整形滤波器得到滤波后的正交信号,将正交滤波器输出相加即可得到调制信号而在接收端,在直接检测后得到的信号,经过模数转换器(ADC)后可采用数字信号处理恢复。CAP 技术通过改变同相和正交波形反映所传输的数据流,在实现相同比特传输速率的情况下,CAP

信号的符号速率只有 PAM 信号的一半,以更低的实现复杂度实现相同的传输速率。

(3)DMT技术。DMT技术将传输信道划分为多个相互正交的子信道,根据每个载波的信噪比的不同对每个载波采用不同调制格式,动态地给每个子信道分配信息传输功率和传输比特数,从而可以最大限度地优化信道的频谱效率,确保系统获得最大的传输速率。近年来,概率编码(PS)作为一种新的技术手段,在长距离单载波相干光调制系统中被广泛研究,其能够在一定信噪比下进一步提高频谱效率。此外,PS技术与多种调制码技术相结合的方案,联合偏振复用(PDM)技术,可以进一步提高IM-DD传输系统的容量,满足数据中心高速光互连的需求。

### 2.3 信号检测

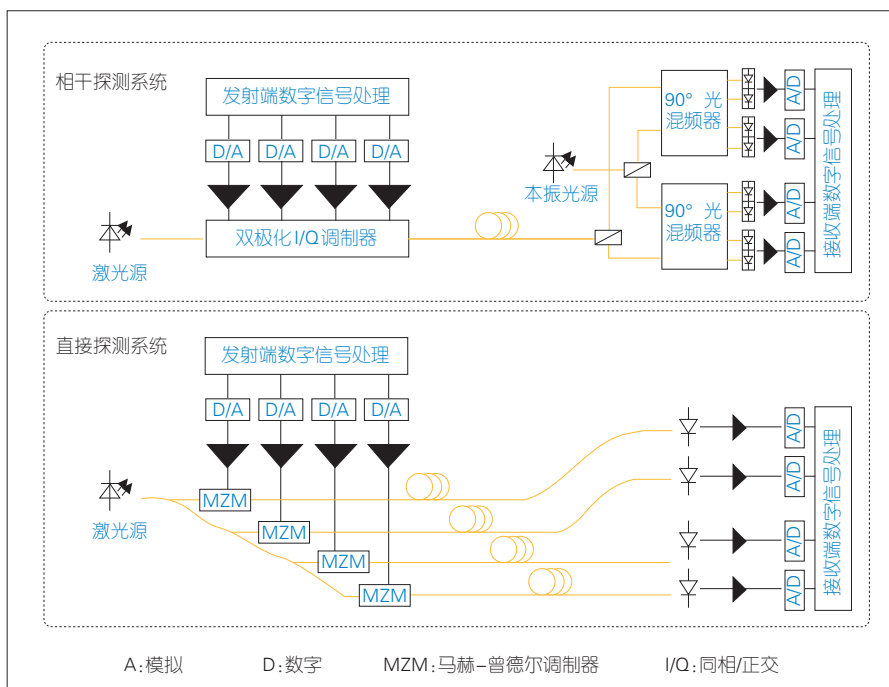
根据接收端信号的检测方式,可以将光传输系统分为直接检测系统和相干检测系统。针对数据中心内部网络密集、短距离、大规模等特点,IM-DD系统具有低成本、低功耗、小尺寸、结构简单等优点,易于集成在光模块中,是高速光互连的理想选择<sup>[20]</sup>。直接探测的信噪比与最小可探测功率皆低于相干探测系统,因此在长距离光传输系统中往往采用相干探测。但在数据中心内部,链路距离小于2 km的内部流量占互联网总流量的80%以上,并在近年来保持快速增长,光信号在传输过程中的功率和信噪比损失很小。另外,随着先进DSP技术和前

向纠错码(FEC)编解码器性能迅速发展,使得接收端对于接收光信号光信噪比(OSNR)的要求大大降低。综上所述,直接检测系统可以支持短距离光互连系统的高速信号传输,且能降低系统的成本,是当前大规模数据中心光互连网络的首要解决方案。相干检测系统因为具有更高的灵敏度,可以支持大容量光传输系统<sup>[21]</sup>。然而,与直接检测系统相比,相干技术的灵敏度提高是以附加的本振光(LO)为代价的。单波长下较高的信道速率得益于其更多的调制维度(X和Y极化、同相和正交(IQ)分量),其结构相比于直接检测系统要复杂的多。在传统当数据中心内部光互连中往往采用简单易集成的IM-DD系统。但是,随着速度和带宽密度的增加,能够提供更高灵敏度和信道容量的数字相干检测在不久的将来可能会用于数据

中心内部互连应用<sup>[22]</sup>。

下一代数据中心光互连架构将会从100 Gbit/s升级到400 Gbit/s的速率。并行光传输是数据中心内部通信的重要方式,在满足高速传输需求的同时,与大规模网络架构中的并行数据通道结构相结合,有助于后端数据处理速度的提升。当前主流的PSM4、CWDM4,以及SR4等技术皆为4通道传输。目前,使用 $4 \times 100$  Gbit/s PAM4信号的400 G收发器已经被实验证明,并有望在不久的将来实现商业化。图3给出了 $4 \times 100$  Gbit/s光传输系统的直接检测与相干检测系统构架。

如图3所示,相干检测系统的结构比直接检测系统更为复杂。它在接收端需要额外的LO与90°混频器,并且需要4个平衡PD以实现X和Y极化方向上IQ分量探测。通过信号的极化复用,这4路信号



▲图3  $4 \times 100$  Gbit/s光传输系统的直接检测与相干检测系统构架

(IX, QX, IY, QY)可以实现在单路光纤上的传输。而直接检测系统需要4路光纤以来实现 $4 \times 100$  Gbit/s的信号传输。

### 3 中兴通讯取得了领先的研究成果

中兴通讯在基于PAM技术的高速光互连进行了深入的研究。表1总结了2018—2019年中兴通讯在数据中心光互连方面最新研究进展。采用PAM4调制和直接检测技术,利用有限带宽的10 GHz DML调制器,中兴通讯在C波段实现了100 Gbit/s传输40 km标准单模光纤<sup>[23]</sup>;采用幅度硬限幅的方法,结合PS和PAM8调制格式,利用EML调制器,实现了260 Gbit/s在C波段传输1 km非零色散位移光纤(NZDSF)<sup>[24]</sup>。为了减少高速光信号在C波段色散的影响,中兴通讯进一步研究了在O波段传输性能。采用半导体光放大器(SOA)作为预放大器对进入光电探测器(PD)的光信号进行放大,并且利用PS-PAM-8调制信号和外腔激光器(ECL)+MZM调制器,中兴通讯成功实现280 Gbit/s传输10 km标准单模光纤,这是目前业界单波长超200 G

传输的最高记录。此外,中兴通讯利用低复杂度外差相干检测的方式,采用PDM-PAM-4调制信号和MZM调制器,成功实现了200 Gbit/s在O波段传输20 km标准单模光纤<sup>[25]</sup>,这种方案避免了I/Q调制器的使用,相关实验结果作为OFC2019 Top scored paper进行了会议报告。

### 4 展望

为了满足快速增长的数据中心流量的相关需求,灵活、低成本的400 Gbit/s速率传输成为下一代数据中心互联应用的备选方案。传统的强度调制/直接检测系统由于结构简单和低成本,与相干方案在短距离光互连比较,仍然占据市场主导地位。为了支持400 Gbit/s速率传输,其中一种有前景的方案是使用PAM调制的 $4 \times 100$  Gbit/(s·λ)传输,这种方法可以降低收发机的设计复杂度和能量功耗。相对于基于外部调制的MZM,使用EML和DML的内调制方案成本较低,设计也更为简单。但是,光电设备的调制带宽限制和调制、解调过程中的非线性损伤问题限制了系统的性能。许多数字信号处理方法被提出用以解决这两种限制。随着数据量

井喷式增长,下一代Ethernet正向着800 GbE或者1.6 TbE演化。这种方案能够减少光源和光电器件的数量,简化传输系统,但是低复杂度高效的DSP还需要我们不断地进行深入研究。

#### 参考文献

- [1] Networking C V. Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021 White Paper[R]. Cisco Public, 2016
- [2] KACHRIS C, KANONAKIS K, TOMKOS I. Optical Interconnection Networks in Data Centers: Recent Trends and Future Challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51 (9): 39. DOI:10.1109/mcom.2013.6588648
- [3] NAGARAJAN R, FILER M, FU Y, et al. Silicon Photonics–Based 100 Gbit/s, PAM4, DWDM Data Center Interconnects[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(7): B25. DOI:10.1364/jocn.10.000b25
- [4] KARINOU F, PRODANU C, STOJANOVIC N, et al. Directly PAM–4 Modulated 1530–nm VCSEL Enabling 56 Gb/s/λ Data–Center Interconnects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1872. DOI:10.1109/lpt.2015.2444096
- [5] LAM C F. Optical Network Technologies for Datacenter Networks [EB/OL]. [2019–07–25]. <https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?URI=NFOEC–2010–NWA3&seq=0>
- [6] 方凯博. 数据中心内部高速光互连技术研究[D]. 复旦大学, 2019
- [7] LEE B G, KUHTA D M, DOANY F E, et al. End–To–End Multicore Multimode Fiber Optic Link Operating up to 120 Gb/s[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(6): 886. DOI: 10.1109/jlt.2012.2183853
- [8] SZCZERBA K, WESTBERGH P, KAROUT J, et al. 30 Gbps 4–PAM Transmission over 200 m of MMF Using an 850 nm VCSEL[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B203. DOI:10.1364/oe.19.00b203
- [9] LYUBOMIRSKY I, LING W A, RODES R, et al. 56 Gb/s Transmission over 100m OM3 Using 25G–class VCSEL and Discrete Multi–Tone Modulation[C]//2014 Optical Interconnects Conference. USA: IEEE, 2014. DOI:10.1109/oic.2014.6886091
- [10] BACA R, KOLESAR P, TATUM J, et al. Advances in Multimode Fiber Transmission for the Data Center[J]. OSA Technical Digest, 2015: W2A.6
- [11] SADOT D, DORMAN G, GORSHTEN A, et al. Single Channel 112Gbit/sec PAM4 at 56Gbaud with Digital Signal Processing for Data Centers Applications[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 991. DOI:10.1364/oe.23.000991
- [12] EISELT N, DOCHHAN A, GRIESSER H, et al. Experimental Comparison of 56 Gbit/s PAM–4 and DMT for Data Center Interconnect Applications, Photonic Networks; 17. ITG–Symposium[C]//Proceedings of USA, VDE. USA:ITU, 2016: 1–5
- [13] YU J J, ZHANG J W, CHIEN H C, et al. 56Gb/

▼表1 数据中心光互连最新研究进展

调制格式	光源	传输速率/(Gbit/s)	传输距离/km	波长/nm	检测方式
PAM4	DML	100	40	1 550	直接检测
PS-PAM-8	EML	260	1	1 550	直接检测
PS-PAM-8	ECL+MZM	280	10	1 310	直接检测
PDM-PAM-4	ECL+MZM	200	20	1 550	外差相干

DML:直接调制激光器  
ECL:外腔激光器  
EML:电吸收调制激光器

MZM:马赫-曾德尔调制器  
PAM:脉冲幅度调制  
PDM:联合偏振复用

- s Chirp-Managed Symbol Transmission with Low-Cost, 10-G Class LD for 400G Intra-Data Center Interconnection[C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w4d.2
- [14] WANG Y Q, YU J J, CHI N. Demonstration of 4 128-Gb/s DFT-S OFDM Signal Transmission over 320-Km SMF with IM/DD[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1. DOI:10.1109/jphot.2016.2545642
- [15] WANG Y, YU J J Yu, CHIEN H-C, LI X, et al. Transmission and Direct Detection of 300-Gbps DFT-S OFDM Signals Based on O-ISB Modulation with Joint Image-cancellation and Nonlinearity-mitigation[C]// ECOC 2016 - 42nd European Conference on Optical Communication. Germany: ECOC, 2016
- [16] TAN Z W, YANG C C, ZHU Y X, et al. A 70 Gbps NRZ Optical Link Based on 850 Nm Band-Limited VCSEL for Data-Center Intra-Connects[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(8): 080406. DOI: 10.1007/s11432-017-9276-y
- [17] SHI J, ZHANG J, LI X, et al. 112 Gb/s/λ CAP Signals Transmission over 480 km in IM-DD System[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2018-W1J.5>
- [18] ZHANG F, ZHU Y, YANG F, et al. Up to Single Lane 200G Optical Interconnects with Silicon Photonic Modulator[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2019-Th4A.6>
- [19] ZHALEHPOUR S, LIN J, GUO M, et al. All-Silicon IQ Modulator for 100 GBaud 32QAM Transmissions[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2019-Th4A.5>
- [20] CHENG J C, XIE C J, CHEN Y Z, et al. Comparison of Coherent and IMDD Transceivers for Intra Datacenter Optical Interconnects[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2019-Th4A.5>
- [21] KUPFER T, BISPLINGHOF A, DUTHEL T, et al. Optimizing Power Consumption of a Coherent DSP for Metro and Data Center Interconnects[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2019-Th4A.5>
- [22] MORSY-OSMAN M, PLANT D V. A Comparative Study of Technology Options for next Generation Intra- And Inter-Datacenter Interconnects[EB/OL]. [2019-07-25]. [https://www.researchgate.net/publication/323562336\\_A\\_Comparative\\_Study\\_of\\_Technology\\_Options\\_for\\_Next-Generation-Intra-\\_and-Inter-datacenter-Interconnects](https://www.researchgate.net/publication/323562336_A_Comparative_Study_of_Technology_Options_for_Next-Generation-Intra-_and-Inter-datacenter-Interconnects)
- [23] ZHANG J, YU J J, LI X Y, et al. 100 Gbit/s VSB-PAM-N IM/DD Transmission System Based on 10 GHz DML with Optical Filtering and Joint Nonlinear Equalization[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6098. DOI:10.1364/oe.27.006098
- [24] ZHANG J, YU J, ZHAO L, et al. Demonstration of 260-Gb/s Single-Lane EML-Based PS-PAM-8 IM/DD for Datacenter Interconnects[EB/OL]. [2019-07-25]. [https://www.researchgate.net/publication/323562336\\_A\\_Comparative\\_Study\\_of\\_Technology\\_Options\\_for\\_Next-Generation-Intra-\\_and-Inter-datacenter-Interconnects](https://www.researchgate.net/publication/323562336_A_Comparative_Study_of_Technology_Options_for_Next-Generation-Intra-_and-Inter-datacenter-Interconnects)
- [25] ZHANG J, YU J, WANG K, et al. 200-Gb/s/λ PDM-PAM-4 PON with 29-dB Power Budget based on Heterodyne Coherent Detection[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2019-Th3F.1>

## 作者简介



余建军, 中兴通讯股份有限公司北美光波所所长、高速光通信首席科学家; 长期从事高速光通信技术的研究; 国家“千人计划”专家, 入选美国 OSA Fellow; 发表论文 600 余篇, 获美国授权专利 70 余项及中国专利 10 余项。

# 光接入网高灵敏度 低成本相干通信技术



## High-Sensitivity and Low-Cost Coherent Communication Technology for Optical Access Network

唐明/TANG Ming, 李伟昊/LI Weihao, 冯振华/FENG Zhenhua

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**摘要:** 基于高性能通信多芯光纤(MCF),提出了一种波分空分混合复用光接入网(WSDM-OAN)架构,并采用MCF中间芯传输本征光、外层芯传输信号光的方式在下行传输(DS)中实现了空分自零差相干探测(SHCD)。相关实验表明,所提出的接入系统下行总传输速率可达4.8 Tbit/s,而且无需采用频偏补偿和相位恢复算法,并可采用10 MHz线宽的分布反馈(DFB)激光器。此外,提出了一种由单抽头复蝶形有限冲击响应(FIR)滤波器、4个 $N$ 抽头实FIR滤波器和 $4 \times 4$ 多输入多输出(MIMO)FIR滤波器构成的简化自适应均衡(AEQ)算法。相关实验表明,所提出的AEQ与 $2 \times 2$  MIMO结构AEQ性能相近,与 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ相比功率代价小于1 dB。当滤波器抽头数25时,可降低59%的实数乘法数。

**关键词:** OAN; MCF; SHCD; AEQ

**Abstract:** A hybrid wavelength division and space division multiplexing optical access network (WSDM-OAN) based on high-performance communication multi-core fiber (MCF) is proposed in this paper. To realize the self-homodyne coherent detection (SHCD) in downstream (DS), the MCF inner cores transmit the local oscillator light, while the outer cores transmit the signal light. The related experiments show that the total transmission rate of the proposed system is up to 4.8 Tbit/s in DS, and carrier frequency offset compensation algorithms and phase recovering algorithms are not required. The distributed feedback (DFB) lasers with 10 MHz linewidth can be adopted in this proposed system. A simplified adaptive equalization (AEQ) algorithm, which consists of a 1-tap complex-valued butterfly finite impulse response (B-FIR) filter, four  $N$ -tap real-valued FIR filters, and a 3-tap  $4 \times 4$  multiple-input multiple-output (MIMO) FIR filter is also proposed. The experiment results show that the proposed AEQ share the same performance with  $2 \times 2$  MIMO AEQ, and the power penalty is less than 1 dB compared with  $4 \times 4$  MIMO AEQ. When using 25-tap filters, the number of real multipliers can be reduced by 59%.

**Key words:** OAN; MCF; SHCD; AEQ

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20190925.1553.002.html>

网络出版日期: 2019-09-26

收稿日期: 2019-07-20

光接入网(OAN)作为最靠近用户侧的光网络,长期以来承载了大量的用户数据业务。无源光网络(PON)以低成本、低功耗、共享基础设施和支持多用户接入等特点被广泛应用于OAN中。受到不断

增长的数据业务的驱动,PON的技术标准历经多次演化。吉比特无源光网络(GPON)和以太网无源光网络(EPON)、非对称10 G EPON(XG-EPON)和10 G GPON(XG-GPON)、40 G PON第2阶段(NG-

PON2)等技术标准受到了广泛关注与讨论。最新的NG-PON2技术标准要求PON能够支撑至少40 km范围的40 Gbit/s下行、10 Gbit/s的上行传输速率,国际电信联盟电信标准分局(ITU-T)最终确立时分和波

分复用(TWDM)-PON技术为NG-PON2的实现方式,利用多个波长传输时分复用(TDM)数据帧<sup>[1-3]</sup>。

为简化网络层结构,减少有源器件使用,降低系统基建费用与维护成本,人们希望将城域网与接入网逐步融合,这就要求PON能覆盖更长的传输距离<sup>[3]</sup>。以第5代移动通信网络(5G)、云计算、超高清视频为代表的新型应用则对接入网带宽的需求日益增加,从而对PON的容量、速率、可扩展性、频谱灵活性及其利用率等提出了更高的要求<sup>[4-5]</sup>。总体来说,覆盖广范围和长距离,支持大容量和高传输速率,满足低成本、低功耗和多用户接入,具有良好可扩展性和灵活性的PON将会是未来的发展趋势。

受限于灵敏度、频谱效率、非线性检测等因素,强度调制-直接检测(IM-DD)技术难以应对OAN的发展趋势。为实现对OAN容量、速率和覆盖范围的全面升级,相干通信技术不失为一种良好的解决方案。基于偏振复用、高阶调制格式和相干探测的数字相干通信技术,具有高频谱效率、高灵敏度、信号损

伤可电域补偿等特点。相比于IM-DD技术在提高传输速率、延长传输距离、可扩展性(扩容)上具有天然的优势,如图1所示。然而,传统的用于骨干网通信的相干光通信技术存在系统结构复杂、硬件成本高昂、器件功耗较大等问题,难以直接移植到对成本敏感的接入网中。针对接入网的应用场景,必须“软硬兼施”,从系统设计和数字信号处理(DSP)2个角度着手,对相干通信系统做出合理的设计与简化。

### 1 基于自零差相干探测(SHCD)的波分空分混合复用(WSDM)-OAN架构

采用低成本器件可有效降低相干通信技术的成本,但受限于低成本器件的带宽,在高传输速率下势必会出现严重的码间串扰(ISI)。有效地利用有限的带宽资源,采用具有高频谱效率的高阶调制格式十分必要。然而高阶调制格式对载波频率偏移(CFO)和相位噪声(PN)敏感,不仅对激光器的线宽、频率稳定性、可调谐性有着较高的要求,同时也需要在接收端DSP模块中采用

复杂的频偏补偿和相噪恢复算法,这极大地增加了光网络单元(ONU)的成本。SHCD技术通过将发射端激光器出射的激光分出一部分光,作为本振光以用作接收端的相干探测,可利用发射端激光器的同源相干性消除经典的相干探测所带来的频率偏移和相位噪声,提高对激光器线宽的容忍度。这不仅可以简化接收机DSP中的频偏补偿和相噪恢复模块,同时使得在发射端采用低成本的非制冷激光器成为可能,能够有效地降低系统的复杂度与成本。SHCD可通过偏振复用(PDM)、空分复用(SDM)等方式实现,PDM的方式即通过两正交偏振态分别传输信号光和本振光,该方式牺牲了信号光场的PDM维度,降低了一半的频谱效率,在高速传输的情形下并不适用。SDM的方式则是通过多路空间信道分别传输信号光和本振光,多芯光纤(MCF)则凭借着空分信道串扰小、数目多、一致性好等特点尤其适合高速、大容量的传输场景。

另一方面,TDM-PON采用用户分占不同时隙共享带宽的方式实现低成本的多用户接入,其ONU中的接收机需要工作在高于所分配的比特速率下,在高传输速率的需求下会极大地增加ONU的成本,同时其基于功率分配的广播属性也带来了额外的功率损耗,单一的TDM-PON技术难以应对高速率、广覆盖的OAN的发展趋势<sup>[3]</sup>。基于波长分配的WDM-PON在功率代价上更具优势,而用户分占波分复用信道独享带宽的特性也使得其能够支持

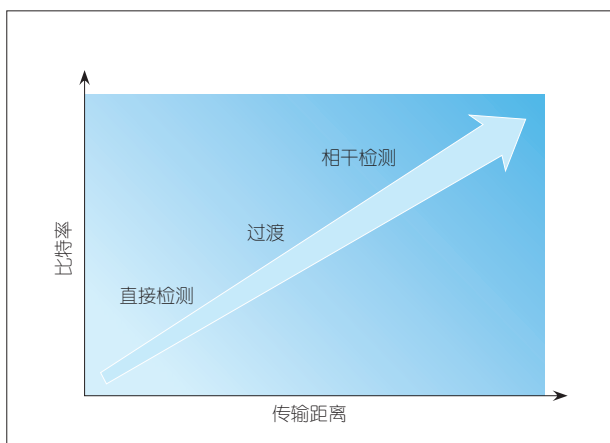


图1 直检相干技术演化趋势

更大的传输速率。

### 1.1 系统架构

在OAN系统架构上,我们在波分复用(WDM)-PON的基础上引入MCF以实现多路空间信道的并行传输,扩展了PON的复用维度(SDM),使其能更好地支撑大容量、可扩展的发展趋势<sup>[6-8]</sup>。为实现广覆盖的OAN,同时更好地支撑高速传输下的高阶调制格式,我们进一步引入SHCD以提升ONU接收机的灵敏度,延长PON的传输距离,扩展其传输速率。同时SHCD架构可降低对发射端激光器的要求和ONU的成本<sup>[5][9][10]</sup>。基于SHCD的WSDM-OAN系统架构如图2所示。在光线路终端(OLT)中,对 $m$ 个激光器分别进行 $N+1$ 等分的分光, $N$ 份用作 $N$ 路空间信道的信号光调制,1份用作本振光。相比于传统的WDM-PON,只采用 $m$ 个激光器

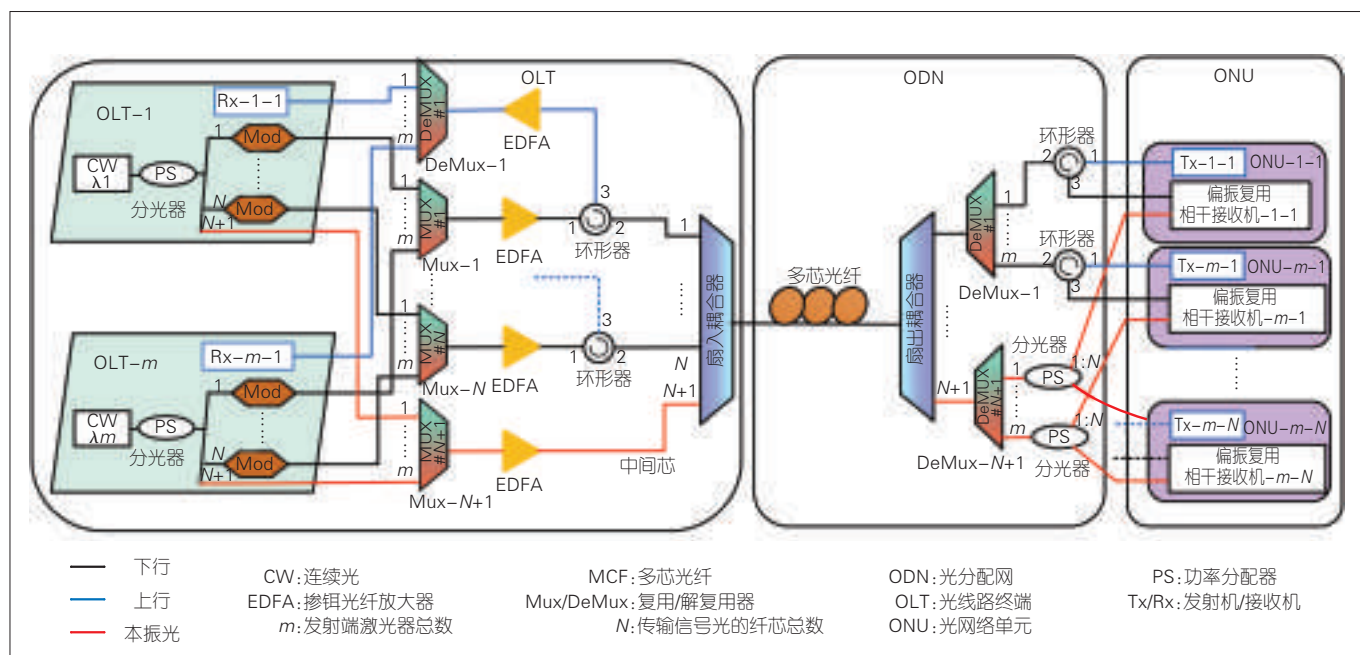
即可实现 $N \times m$ 位用户接入,在文献[8-9]中我们也曾演示过利用单个激光器、马赫·曾德尔调制器(MZM)调制器和微波信号源生成光频梳,作为WDM信号源的方式。下行信号的调制可采用基于偏振复用(PDM)的具有高频谱效率的多级正交幅度调制(M-QAM)的单载波调制技术,也可采用OFDM等多载波调制技术<sup>[9-10]</sup>。 $N \times m$ 路信号光经调制后先通过 $N$ 个波分复用器耦合为 $N$ 路 $m$ 波的WDM信号,经 $N$ 个掺铒光纤放大器(EDFA)放大后经光环形器并由扇入器件从 $N$ 根单模光纤(SMF)耦合进MCF相应的纤芯中实现SDM,本振光则通过波分复用器后经扇入器件耦合进MCF的中间芯。经MCF传输后,信号光由扇出设备耦合到 $N$ 根SMF中实现空间解复用,并由 $N$ 个波分解复用器实现波长分配,将各信号分支分发给 $N \times m$ 个ONU,本振光在

经过扇出设备后由波分解复用器分波,并由功率耦合器对每个波长进行 $N$ 等分的分光,然后分发给相应的ONU用作相干探测。而上行传输则可采用具有高频谱效率的IM-DD调制格式。

### 1.2 实验结果

实验装置具体如图3所示,图3a)即为所采用的弱耦合(芯间串扰 $<-45$  dB)7芯光纤横截面结构图,光纤总长37 km,在1550 nm处光纤各纤芯损耗 $<0.3$  dB/km,色散 $17 \pm 1$  ps/(nm·km),与SMF相似。图3b)为本课题组自研的连接SMF和MCF所用的低损耗扇入/扇出空分复用/解复用耦合器。

在下行传输中采用中间芯传输本振光,外层芯传输信号光的方式实现SHCD。4个激光器构成WDM光源,采用双偏矢量光调制器(PDM-IQM)实现PDM-16 QAM-



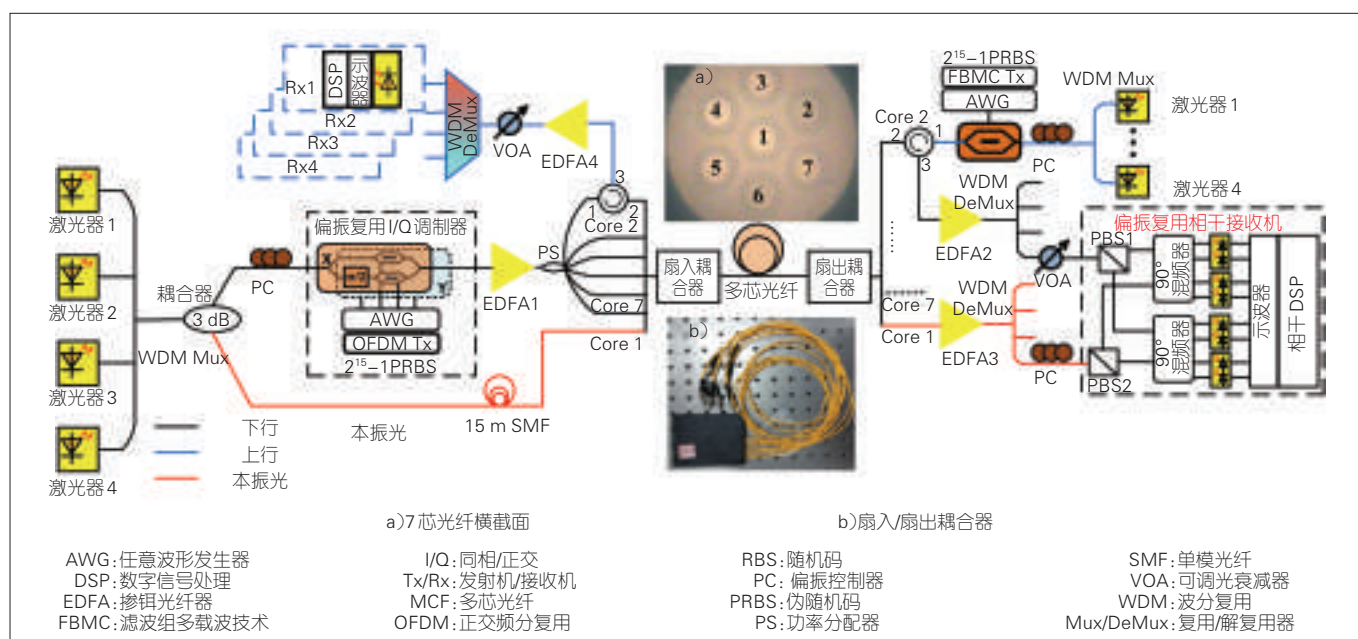
▲图2 基于自零差相干探测的波分空分混合复用光接入网系统架构

OFDM信号的调制。任意波形发生器(AWG)工作在25 GS/s的采样速率下,最后采用商用的相干接收机进行相干接收。将数字采样示波器(DSO)用作模数转换器(ADC),工作在80 GS/s的采样速率下,在MATLAB中利用去掉了频率补偿和相位恢复的经典偏振复用的相干光正交频分复用(PDM-CO-OFDM)解调算法实现对信号的离线处理,

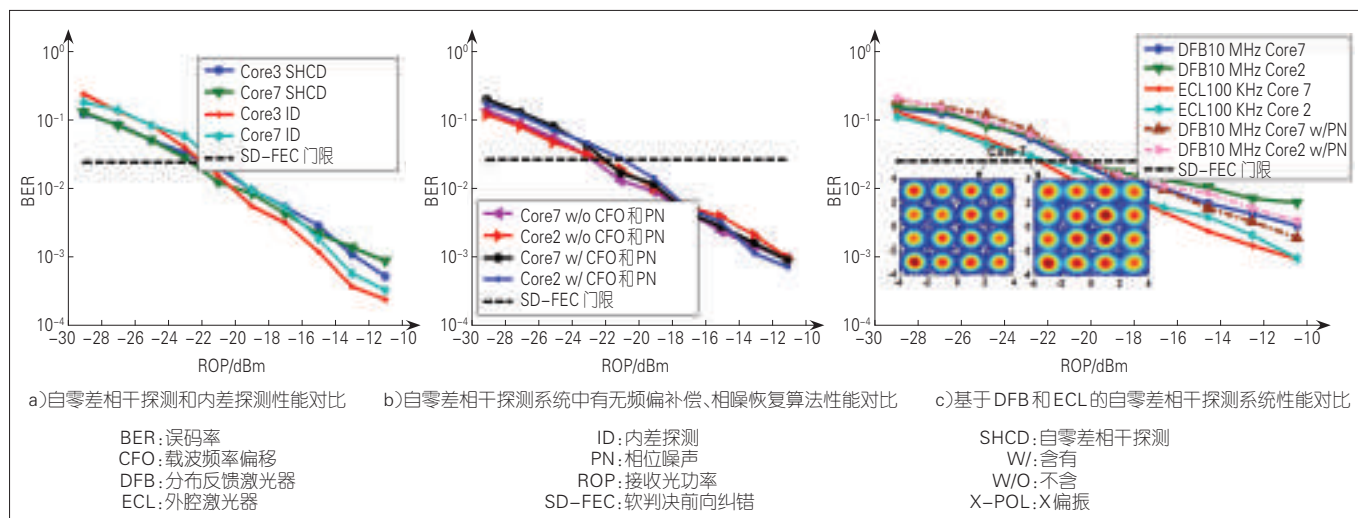
对应的单波传输速率为200 Gbit/s。实验中在接收机前采用偏振控制器(PC)以避免本振光经MCF传输后某偏振方向上可能的载波衰落问题。另外,由于实验所采用的相干接收机中跨组放大器(TIA)的偏置电压尚未优化,导致接收机的灵敏度不高。因此在波长解复用之前,分别采用2个EDFA对信号光和本征光进行了放大,并将输入相干接

收机的本振光功率固定在13 dBm。

为说明SHCD架构在性能和成本上的优势,我们在OLT中采用2种激光器:窄线宽(约100 kHz)外腔激光器(ECL)以及10 MHz线宽的DFB激光器,经典的相干系统在接收端采用额外的激光器用作本振光源,其中心频率相比于载波频率有所偏移,对应于内差探测。图4 a)、b)对应的实验中采用的是ECL,另



▲图3 基于自零差相干探测的波分空分混合复用光接入网系统实验装置图



▲图4 自零差相干探测架构传输实验

外采用 20% 的软判决前向纠错 (SD-FEC), 对应的误码率 (BER) 门限  $2.4 \times 10^{-2}$ 。(1) 我们对 SHCD 和内差探测 2 种架构进行了对比, 如图 4 a)。可见在低接收光功率 (ROP) 下, SHCD 性能略优, 这是由于内差探测的相噪恢复算法在低 ROP 下计算误差较大; 而在高 ROP 下, SHCD 略差于内差探测, 主要是由于 SHCD 的本振光经 EDFA 放大后光信噪比 (OSNR) 有所劣化, 若采用高灵敏度的相干接收机, 则无需利用 EDFA 对本振光放大, SHCD 将会具有更好的性能。(2) 我们分别对比了基于 SHD 的传输架构在 DSP 中含 PN、CFO 补偿和不含 PN、CFO 补偿时的性能, 如图 4 b)。在低 ROP 时, 无 PN 和 CFO 补偿的性能略优; 在高 ROP 时, 含 PN 和 CFO 补偿的性能更优, 这同样是由于低 ROP 时 PN 和 CFO 补偿算法的精度引起的。但总体来看, 整体差异不大, 这表明采用 SHCD 架构消除 DSP 中 CFO 和 PN 补偿模块具有可行性。(3) 为得到基于 MCF 的 SHCD 架构对激光器线宽的容忍度, 探索采用低成本的大线宽激光器的可能, 我们分别采用线宽约 100 kHz 的 ECL 和线宽约 10 MHz 进行了下行传输实验, 并在本征光支路加入一根 15 m 的光纤补偿由 EDFA 引入的延时差, 具体如图 4 c) 所示。对比基于 ECL 和 DFB 的下行传输 BER 曲线可知, 在 SD-FEC 门限上, 采用 10 MHz 的 DFB 引入的功率代价相比于采用 100 kHz 的 ECL 小于 2 dB。而采用相位补偿算法后, 基于 DFB 的 SHCD 系统性能在高 ROP 下略有提

升, 低 ROP 下基本相当, 表明在 SHCD 架构中采用低成本的大线宽激光器具有可行性。

其次, 为展示所提出的同源相干 WSDM-OAN 的扩容能力, 我们采用 4 个波长间隔 100 GHz 的 ECL 作为 WDM 信号的光源, 开展了 WSDM-OAN 的下行传输实验。在单波的下行传输实验中, MCF 各纤芯的一致性较好, 如图 5 a) 所示。WSDM-OAN 下行传输实验中, 为方便起见, 我们仅给出 7 号芯中各波分信道的传输结果, 如图 5 b) 所示。对比可知各波长信道性能相近。6 芯 4 波单波速率 200 Gbit/s 的 WSDM-OAN 总速率可达 4.8 Tbit/s, 基于更多波长的 WDM 和更多纤芯 MCF 的 SDM 能够支撑更大容量的 OAN 接入, 因而 WSDM-OAN 在扩充接入网容量上具有巨大潜力。

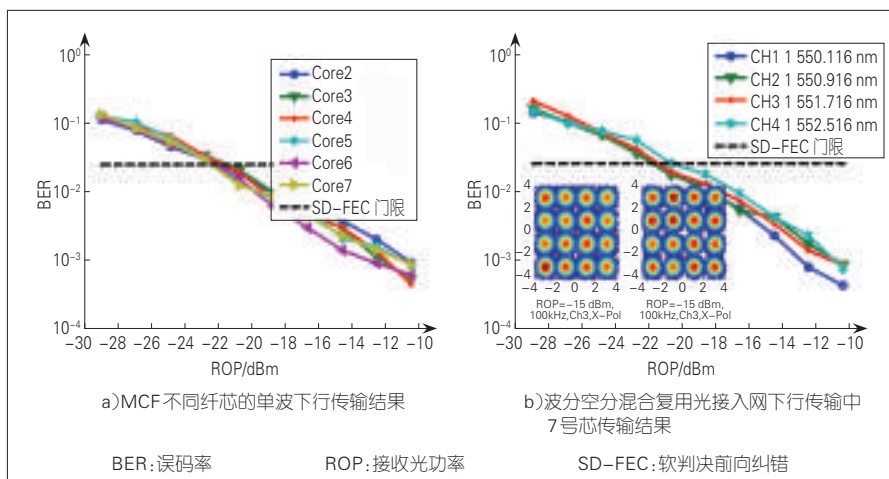
## 2 低计算复杂度简化自适应均衡 (AEQ)

上一节中所展示的 SHCD 传输已验证了去掉 DSP 中频偏补偿和相位恢复模块的可行性。而针对残留

色散、偏振模色散和高频衰落补偿的 AEQ 算法仍然具有较高的计算复杂度。进一步合理简化 DSP 不仅有利于实现低功耗、低成本的 ONU, 对构建低延时的移动前传/回传网络同样具有重要意义。K. MATSUDA 等人提出将 AEQ 中  $N$  抽头的蝶形有限冲击响应 (B-FIR) 滤波器拆分为单抽头的 B-FIR 滤波器和 2 个  $N$  抽头的 FIR 滤波器 (后续称为 KM-AEQ), 分别用于解偏振复用和补偿偏振无关信号损伤。该方案相比于由 4 个复值 FIR 滤波器构成的  $2 \times 2$  多输入多输出 (MIMO) 结构 AEQ 计算复杂度近乎减半, 然而牺牲了对差分群时延 (DGD) 的补偿能力<sup>[11]</sup>, 同时对 X/Y 偏振和 I/Q 路信号之间的时间倾斜较为敏感<sup>[12]</sup>。

### 2.1 AEQ 原理

针对短距相干接入的场景, 由色散引起的 I 路和 Q 路信号间串扰较小, 我们可进一步将 KM-AEQ 中  $N$  抽头复 FIR 滤波器实数化, 并引入由 16 个 3 抽头实 FIR 滤波器构成的  $4 \times 4$  MIMO 结构 AEQ 补偿 X/Y 偏



▲ 图 5 不同复用信道性能测试

振和 I/Q 路信号间的时间倾斜,该结构亦可有效地补偿残留色散和 DGD,对应的 AEQ 结构具体如图 6 所示<sup>[12]</sup>。

采用多级恒模算法更新单抽头的 B-FIR 和 2 个  $N$  抽头实 FIR 的抽头系数,分别对应式(1)和式(2)。

$$m_{pq} = m_{pq} + \mu e_p E_{p,\text{mid}2} \sum_{k=1}^N E_{q,\text{in}}^*(k),$$

$$(p,q) \in (X,Y) \quad (1)$$

$$h_{x/y} = h_{x/y} + \mu e_{x/y} \text{Re}(E_{x/y,\text{mid}2}) \text{Re}(E_{x/y,\text{mid}1}) \quad (2)$$

其中,  $\mu$  为步长,  $e$  为误差项,  $E_{p,\text{mid}1}$  和  $E_{p,\text{mid}2}$  滤波后的中间结果,  $E_{x/y,\text{mid}1}$  为连续  $N$  个经偏振解复用的中间结果构成的向量,  $h_{x/y}$  为  $N$  抽头实 FIR 的抽头系数, \* 表示复共轭。

由于乘法运算对应的计算复杂度远高于加法运算,为比较不同结构 AEQ 的计算复杂度,我们列出每计算 2 个符号(X/Y 偏振)对应总实数乘法次数,如表 1 所示。可见,当抽头数  $N$  很大时,所提出的 AEQ 能减少近 75% 的乘法运算,极大地降低了 AEQ 的复杂度。

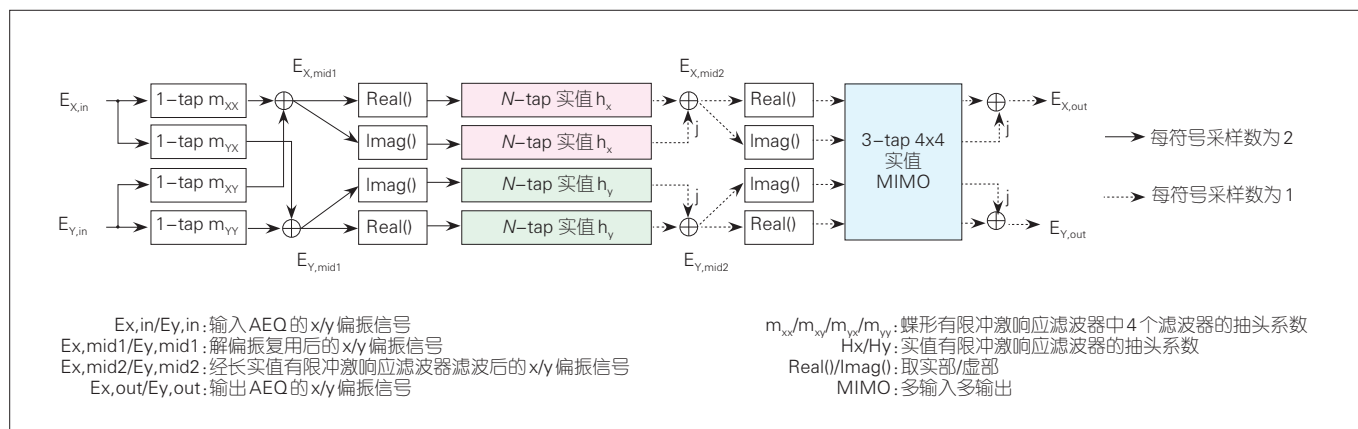
## 2.2 实验结果

实验系统架构如图 7 所示,在

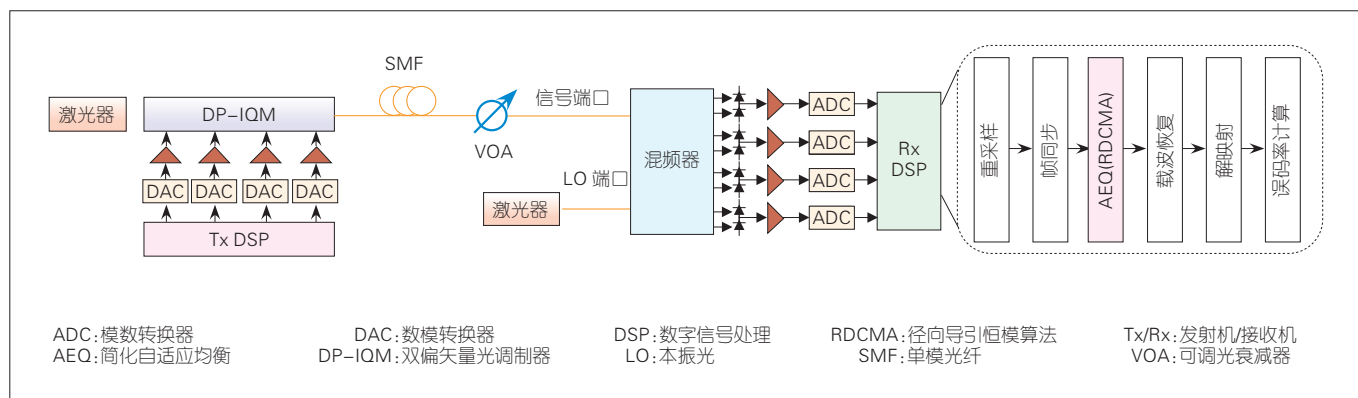
发射端 DSP 中离线生成经滚降系数 0.1 根升余弦滤波器滤波的 28 Gbaud PDM-16QAM 信号,利用采样速率 64 GS/s 的 DAC 转化为相应的模拟信号以驱动双偏矢量光调制器(DP-IQM)完成信号的调制,信号光经 5 km 的 SMF 传输后,经可调光衰减器(VOA)后与 13 dBm 的本振光混频,最后经相干探测后由采样速率 80 GS/s 的 ADC 转化成数字信号并交由接收端 DSP 处理。ADC

▼表 1 AEQ 实数乘法次数对比

算法	2 × 2/4 × 4 MIMO AEQ	KM-AEQ <sup>[11]</sup>	提出的 AEQ
实数乘法/次	16N	8N+16	4N+64
MIMO:多输入多输出      AEQ:简化自适应均衡      KM-AEQ:K.MATSUDA 等人提出的简化自适应均衡			



▲图 6 简化自适应均衡结构



▲图 7 实验装置和接收端 DSP

与DAC共享时钟以消除时钟恢复算法,信号重采样至每符号2个采样点,经帧同步后由AEQ进行处理,采用径向导引恒模算法(RDCMA)更新FIR滤波器抽头系数。然后利用载波恢复算法补偿频率偏移和相位噪声,最后对符号进行判决并计算误码率。

我们比较了提出的AEQ和 $2 \times 2$  MIMO结构AEQ、 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ以及KM-AEQ的性能,抽头数设为25以平衡性能与复杂度。由图8 a)、b)可知,无论是光背靠背还是经5 km传输后,相比于 $2 \times 2$  MIMO和 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ,在硬判决门限 $3.8 \times 10^{-3}$ 上KM-AEQ的功率代价均超过2 dB,若在KM-AEQ上引入后置滤波器,KM-AEQ性能会显著改善,这表明KM-AEQ对X/Y偏振和I/Q路时间倾斜十分敏感;而所提出的AEQ则与 $2 \times 2$  MIMO结构AEQ性能相差无几,和 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ相比也仅存在较小的功率代价,但是其对应的实数乘法总数却下降了59%。图8 c)展示

了所提出的AEQ相比于 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ的相对功率代价随传输距离的变化关系,可见随着传输距离的延伸,所提出的AEQ相比于 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ性能急剧劣化,这是由于色散所引起的I/Q路信号间串扰未得到有效的补偿,因而为支撑长距离的OAN系统,我们所提出的简化方案尚需要进行进一步地讨论。

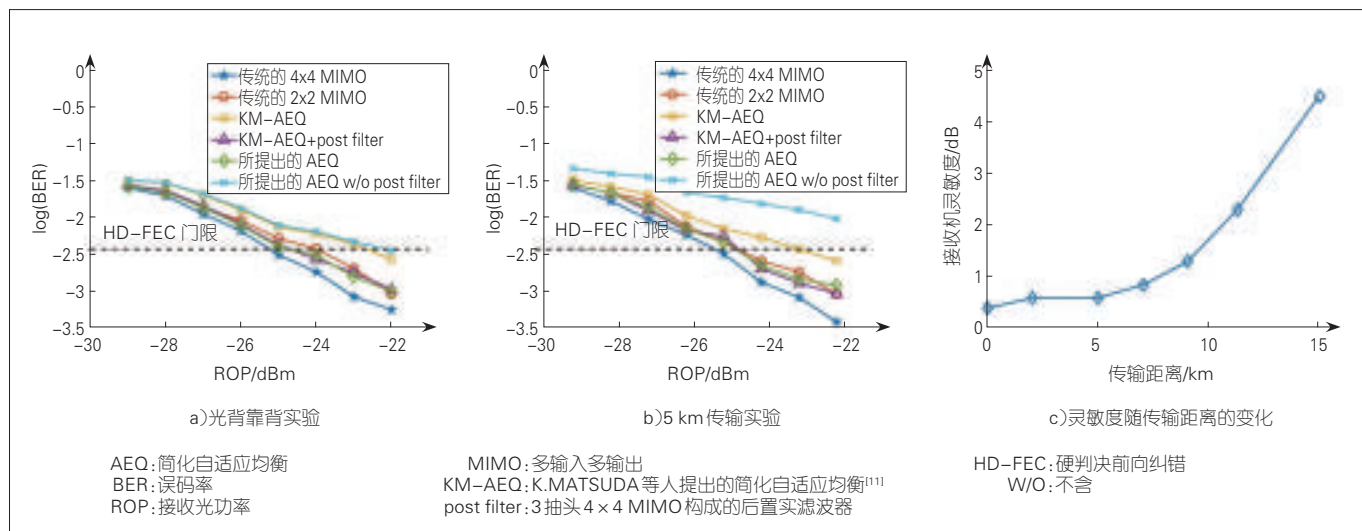
### 3 结束语

相干光通信技术具有高灵敏度、高频谱效率和信号损伤可电域补偿等特点,能够有效地实现对OAN容量、速率和覆盖范围的全面升级。为在接入网中实现低成本的相干光通信,我们提出了一种基于SHCD和MCF的WSDM-OAN架构,利用SHCD消除了DSP中的PN和CFO补偿模块,并展现了发射端采用10 MHz线宽的DFB激光器的可行性。下行利用7芯光纤的6个外层芯传输4路波分复用信号,WSDM-OAN的下行总速率可达

4.8 Tbit/s,能覆盖37 km的传输距离,并具有良好的可扩展性。此外,为实现低功耗的DSP,我们进一步提出了一种简化自适应均衡算法,采用单抽头复值B-FIR滤波器解偏振复用,4个N抽头实值FIR滤波器进行数字均衡,并利用3抽头的实值后置 $4 \times 4$  MIMO FIR滤波器补偿X/Y偏振和I/Q路信号间的时间倾斜。5 km的传输实验表明,所提出的AEQ和 $2 \times 2$  MIMO结构AEQ性能相近,和 $4 \times 4$  MIMO结构AEQ相比功率代价小于1 dB,然而滤波器抽头数为25时,其对应的实数乘法数减小了59%。

#### 参考文献

- [1] NESSET D. NG-PON2 Technology and Standards[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 1136
- [2] FENG Z, Xu L, Wu Q, et al. Large-Capacity Optical Access Network Utilizing Multicore Fiber and Self-Homodyne Coherent Detection [C]//Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. USA: IEEE, 2017.DOI: 10.1364/OFC.2017.Th1K.2
- [3] ABBAS H S, GREGORY M A. The Next Generation of Passive Optical Networks: A



▲ 图8 AEQ性能测试

- Review[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 67: 53. DOI:10.1016/j.jnca.2016.02.015
- [4] LIU X, EFFENBERGER F. Emerging Optical Access Network Technologies for 5G Wireless [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 8(12): B70–B79
- [5] FENG Z H, LI B R, TANG M, et al. Multicore Fiber Enabled WSDM Optical Access Network with Centralized Carrier Delivery and RSOA Based Adaptive Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 7201309. DOI:10.1109/JPHOT.2015.2445103
- [6] LI B R, FENG Z H, TANG M, et al. Experimental Demonstration of Large Capacity WSDM Optical Access Network with Multicore Fibers and Advanced Modulation Formats[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 10997–11006. DOI:10.1364/OE.23.010997
- [7] FENG Z H, LI B R, TANG M, et al. Multicore Fiber Enabled WSDM Optical Access Network with Centralized Carrier Delivery and RSOA Based Adaptive Modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 7201309. DOI:10.1109/JPHOT.2015.2445103
- [8] LI B, LIN G, FU S, et al. Experimental Demonstration of Symmetric WDM–SDM Optical Access Network Over Multicore Fiber [EB/OL].[2019–09–12]. [https://www.researchgate.net/publication/303719451\\_Experimental\\_Demonstration\\_of\\_Symmetric\\_WDM-SDM\\_Optical\\_Access\\_Network\\_over\\_Multicore\\_Fiber](https://www.researchgate.net/publication/303719451_Experimental_Demonstration_of_Symmetric_WDM-SDM_Optical_Access_Network_over_Multicore_Fiber)
- [9] XIONG C X, TANG M, KE C J, et al. Experimental Demonstration of Ultra–Dense WDM–PON with 7–Core MCF Enabled Self–Homodyne Coherent Detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 99: 1. DOI:10.1109/JPHOT.2017.2677503
- [10] FENG Z, XU L, WU Q, et al. Ultra–High Capacity WDM–SDM Optical Access Network with Self–Homodyne Detection Downstream and 32QAM–FBMC Upstream [J]. 2017, 25(6): 5951–5961. DOI:10.1364/OE.25.005951
- [11] MATSUDA K, MATSUMOTO R, SUZUKI N. Hardware–Efficient Adaptive Equalization and Carrier Phase Recovery for 100–Gb/s/λ–Based Coherent WDM–PON Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(8): 1492–1497. DOI: 10.1109/JLT.2017.2784804
- [12] CHENG J, XIE C, TANG M, et al. A Low–Complexity Adaptive Equalizer for Digital Coherent Short–Reach Optical Transmission Systems[EB/OL].[2019–09–12]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2019-M3H.2>
- [13] XIE C, WINZER P. Increasing Polarization–Mode Dispersion Tolerance of Coherent Receivers by Joint Optimization of Chromatic Dispersion and Butterfly Equalizers[C]// Signal Processing in Photonic Communications. USA:IEEE,2013. DOI: 10.1364/SPPCOM.2013.SPM2E.5
- [14] ZHANG J W, YU J J, CHI N, et al. Time–Domain Digital Pre–Equalization for Band–Limited Signals Based on Receiver–Side Adaptive Equalizers[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20515. DOI:10.1364/oe.22.020515

## 作者简介



**唐明**, 华中科技大学教授、博士生导师; 主要研究领域为高速光纤通信系统; 先后主持国家自然科学基金优秀青年项目、国家自然科学基金重点项目、国家“863”计划主题项目以及重点研发计划课题等; 发表 SCI 论文 80 余篇(近 5 年 60 篇), 被 SCI 他引 850 余次, Google Scholar 数据库中索引超过 2 500 次, H 指数为 24。



**李伟昊**, 华中科技大学在读硕士研究生; 研究方向为高速光传输系统和光互连中的光电子器件集成。



**冯振华**, 华中科技大学博士研究生, 现任烽火通信科技股份有限公司工程师; 主要研究领域为中短距光纤通信系统, 发表论文 40 余篇, 拥有专利 10 项。

# 面向数据中心光互连的高速光传输技术

## High-Speed Transmission Technologies for Data Center Optical Interconnection

张帆/ZHANG Fan, 朱逸箫/ZHU Yixiao

(北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)  
(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,  
Peking University, Beijing 100871, China)



**摘要:** 数据中心光互连场景可分为数据中心内部和数据中心之间2大类。对于数据中心内部光互连,利用新型调制方案、高性能光器件和高速数字信号补偿算法是提升单通道速率的主要方式;对于数据中心之间光互连,结合单边带调制和非线性补偿算法克服色散功率衰落是重要研究方向。未来数据中心的升级依赖于光电器件和数字信号处理的共同进步。

**关键词:** 光互连;直接检测;自相干检测;数字信号处理

**Abstract:** Intra-data center and inter-data center optical interconnects are two categories of data-center application scenarios. For intra-data center optical interconnect, novel modulation schemes, high-performance optical devices and compensation algorithms for high-speed digital signal are enabling technologies to increase the line-rate; while for inter-data center optical interconnect, the combination of single-sideband modulation and digital nonlinear mitigation algorithm is the key approach to overcome the fiber dispersion induced power fading effect. The upgradation of future data-center interconnect relies on the development of both optoelectronic devices and digital signal processing.

**Key words:** optical interconnects; direct detection; self coherent detection; digital signal processing

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191011.1500.004.html>

网络出版日期: 2019-10-11

收稿日期: 2019-07-25

光纤通信系统由于其传输损耗低、可用带宽大、信道稳定等优点成为现代信息社会的重要基础设施。近年来,随着云计算、移动互联、虚拟现实等新型宽带业务的发展,大数据时代数据容量的增长逐渐从超长距离传输的核心网向中短距离城域网络传输转移。在数据中心内部,数十万计算节点(服务器)存储和处理网络基础设施的大量云数据。因此,在以云服务和应用为主导的时代,数据中心(DC)贡献了

大部分的全球互联网协议流量。根据思科(Cisco)全球云指数预测:从2016—2021年,数据中心流量将以平均每年25%的速度增长近3倍多。到2021年底,全球超大数据中心数量将会增加到628个。与此同时,全球数据中心年流量将增长到20.6 ZB(1 ZB=10<sup>21</sup> B)<sup>[1]</sup>。与超长距离传输不同,短距离光传输和光互连对每比特成本和能耗更为敏感。如何实现低成本高速光传输,是光通信技术必须应对的重要课题。

根据传输距离划分,数据中心光互连的场景可以分为3类:数据中心内部、数据中心之间和扩展距离数据中心之间光互连<sup>[2]</sup>,具体如图1所示。对于数据中心内部光互连,其典型传输距离在300 m以内,这一场景占据了77%的数据流量。考虑到光模块的成本,由于垂直腔面发射激光器(VCSEL)能够在一块晶圆上制备,结合大纤芯直径的多模光纤(MMF)具有更高的耦合效率,因此基于VCSEL和MMF的强

度调制直接检测(IM-DD)一直是数据中心内部光互连的主要实现方式<sup>[3-5]</sup>。对于传输距离在20 km以下的数据中心之间光互连,在这一距离范围内,多模光纤将出现严重的模式间色散导致码间串扰,于是标准单模光纤取而代之成为主要选择。另一方面,这一距离的链路衰减仍然较小,往往可以不采用光放大器以降低成本。考虑到接收功率灵敏度(RS)这一系统优化指标,先进的光电二极管例如高带宽雪崩光电二极管(APD)由于其RS比传统PIN光电探测器(PD)低得多,因此在这一场景下有着重要的应用<sup>[6]</sup>。此外,色散的影响会随着波特率和距离而增大,在直接检测接收端平方律的影响下,可能会出现非线性的信号损伤,所以大多选择在零色散的O波段传输以避免这一问题。最后,扩展距离数据中心光互连对应着20~80 km的传输距离,此时通信波段从O波段转移到C波段以降低传输损耗,同时光放大器也逐渐被接受。相应地,色散的影响将

被进一步加重,色散导致的双边带功率衰落严重限制着传输速率<sup>[7]</sup>。为此,当前的研究热点是采用一些自相干的调制方案如单边带信号<sup>[8-11]</sup>避免这一效应。虽然直接检测收发机相比于相干检测仍具有成本上的优势,但随着速率的升级、相干收发机成本的降低,相干检测方案未来可能会逐步下沉到扩展距离数据中心光互连。

本文中,我们将从数据中心内部和数据中心之间2方面进行展开,介绍当前热门的几种数字调制和接收方案,并比较其优缺点。

## 1 数据中心内部光互连

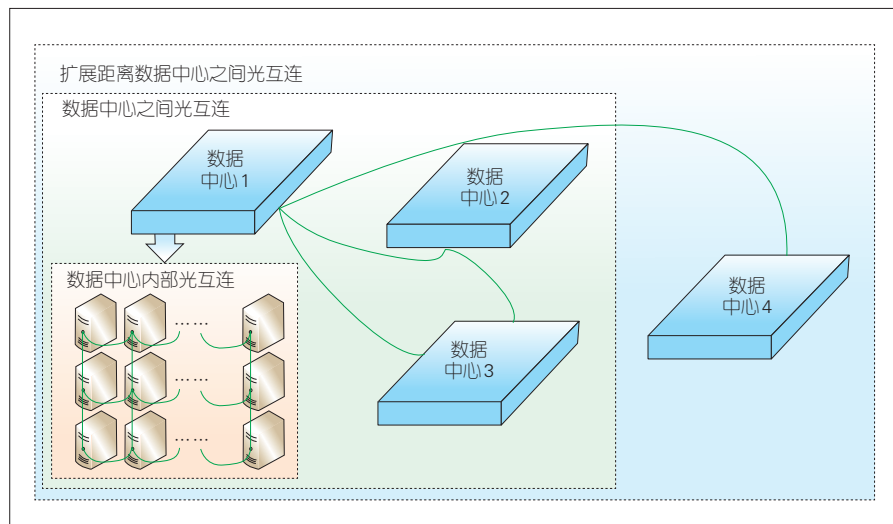
近年来,学术界的一个努力方向是借鉴长距离光纤传输系统的发展轨迹,将数字信号处理引入短距离光互连,以进一步补偿信道损伤,提升传输容量。但是,考虑到市场对短距传输收发机的成本关注度,直接套用数字相干的方案不太可行。另外,收发器的尺寸因子、端口密度、总物理连接数以及单位面积

上的比特率,这些都是决定数据中心总规模和能量利用率的重要参数。这些约束使得光模块在物理层面临着前所未有的挑战,下一代数据中心需要有创新的信号产生/检测方案和数字信号处理算法。

### 1.1 调制方案

从接口速率演进的角度来看,100 GE标准的主要实现方式为4路并行的开关键控(OOK)调制信号,单通道速率为25 Gbit/s。而面向400 GE标准,需要采用更高频谱效率的调制方式,以降低对光模块的带宽要求。目前,基于56 Gbaud的4电平脉冲强度调制(PAM4)信号已经被标准采纳。更进一步地,对于下一代800 GE或1 TE的接口标准,IM-DD仍将占据主流,其中4路并行每通道200/250 Gbit/s传输速率是一种较为可行的方案。这就需要发挥数字信号处理器(DSP)的作用,在35 GHz左右带宽的收发机上实现高速高频谱效率调制,并尽可能地提升接收灵敏度。接下来我们将介绍近几年来比较热门的3种数字调制技术:PAM、无载波幅度相位调制(CAP)和离散多音频调制(DMT)。

PAM调制通过增加发送符号的电平数来实现,是一种简单而又有效的方案。它相比传统的OOK频谱效率翻倍,从而降低了器件的带宽需求;但缺点是降低了功率预算,并增大了调制线性度的一些相差要求。在3种方案之中,PAM对数模转换器(DAC)和模数转换器(ADC)的要求最低。此外,相比于



▲图1 数据中心光互连分类示意图

正交幅度相位调制(QAM)信号, PAM信号相当于省去了一个正交分量,因此PAM-M的频谱效率减半为 $\log_2(M)/2$ 。

CAP是另一种基于QAM信号的强度调制方案。对于基带的QAM信号,设计一对正交的上变频后的成型滤波器,通过分别卷积同相/正交(I/Q)分量实现信号的数字上变频。在上变频后左右边带相互共轭对称,因此变成一维实数信号。同时由于两个边带携带相同信息,因此其频谱效率与相同调制格式的PAM信号相同。

DMT是一种基带的正交频分复用调制(OFDM),相比于传统的OFDM信号,只对其中一半的子载波(正频率)调制信号,而另一半子载波(负频率)上发送对应位置复共轭的信号,来保证整个DMT符号为实数。DMT调制的一大优势是,可以根据器件和链路的各个频率点的信噪比灵活地进行比特和功率加载,从而提升频谱效率。

图2为PAM/CAP/DMT 3种调制方案的收发端数字信号处理流程图。通过对比可以看出,PAM调制方案具有最低的计算复杂度。而CAP格式由于在中频进行IQ调制,因此在相同比特率和频谱效率的情况下,相比于PAM调制只需要一半的波特率,于是也降低了收发端DAC和ADC的采样率要求。对于DMT调制方案,由于需要进行傅里叶变换及其逆变换,因此具有最高的计算复杂度。而这一过程也使得信号具有较高的峰均比(PAPR),所以对DAC和ADC的量化比特数要

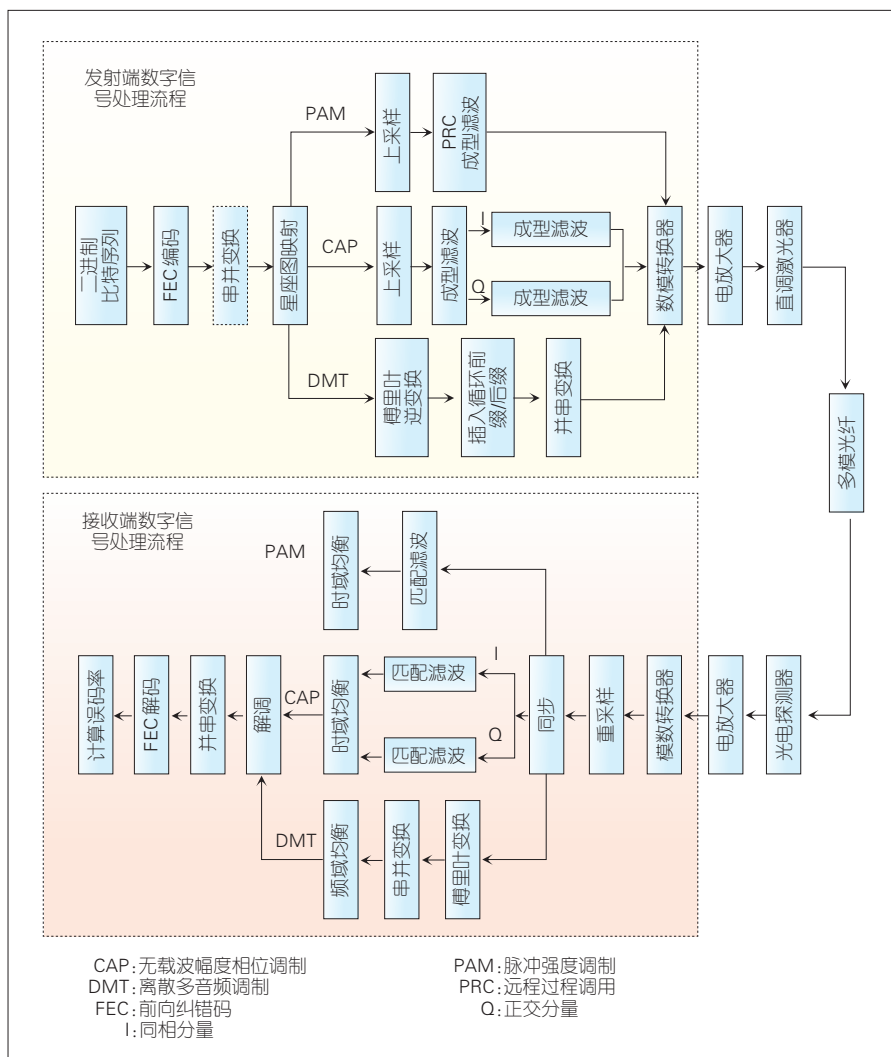
求很高。在接收端,不同于PAM和CAP常用的时域均衡,DMT因为信息调制在频域,因此可以对各个子载波采用1抽头的频域均衡,在信道估计和均衡过程中复杂度很低。

## 1.2 高速数字信号补偿算法

除了上述介绍的调制方案之外,通过DSP可以缓和收发端器件的带宽不足,以进一步适应高速传输的需求。

(1)预均衡<sup>[12]</sup>。针对带宽受限系统,发射端预均衡是一种简单有

效的补偿方法。首先,在不做任何补偿的情况下发送数据,通过接收端的均衡器估计出系统端到端的时域或者频域响应,再将估计出系统响应的逆在时域与发送数据卷积(或者在频域与信号相乘),这样就能在发射端相对提升信号高频分量来抵抗器件的低通滤波效应。经过信道传输后,接收端可以实现较为平坦的信号频谱,从而降低码间串扰。这种方案的缺点是需要对每个特定系统都要进行一次基于负反馈的校准过程,灵活性较差。



▲图2 PAM/CAP/DMT的收发端数字信号处理流程图

(2)后均衡<sup>[13]</sup>。后均衡也被称为接收端的超奈奎斯特技术。它的原理可以这样理解:对于一个带宽不足的信号,经过接收端均衡器之后,信号的高频分量被抬升以抑制码间串扰。与此同时,原本平坦的带内噪声的高频部分也被加重,劣化了最终的误码性能。后均衡方法首先在均衡器之后加入一个两抽头的数字后滤波器实现低通滤波,它的时域响应的 $z$ 变换可以表示成: $H(Z) = 1 + \alpha z^{-1}$ ,  $\alpha \in [0, 1]$ 。于是,在引入一个简单并且已知的码间串扰的前提下可以抑制均衡增强的带内噪声。其中, $\alpha$ 的值可以进行优化,使 $H(z)$ 的频域响应与均衡前的信号频谱尽可能相似。之后,这个

已知的码间串扰可以通过基于维特比译码算法的最大似然序列检测(MLSD)消除。后均衡方法不需要对发射端进行额外操作,并且可以根据系统带宽限制的严重程度优化数字后滤波器的抽头权重,灵活性较高,缺点是最大似然序列检测的算法复杂度和存储空间较大。

查找表算法(LUT)主要用于降低高速系统中与发送序列相关的模式损伤<sup>[14]</sup>。它具有计算复杂度低、配置灵活等优点,可以应用于纠正强度调制直接检测系统中的非线性损伤问题。如图3所示,考虑前后共 $2M+1$ 个符号对中间时刻符号的影响,所有可能的发送符号序列记为 $X(k-M:k+M)$ 。初始状态时

查找表中数据全部置零,滑动窗口每次选取发送序列中的 $2M+1$ 个符号,并计算这种模式的地址,即查找表索引 $i$ 。 $Y(k-M:k+M)$ 表示在接收端得到的恢复序列,发送序列和接收序列的中心符号相减得到误差 $e(k)$ 。随着滑动窗口不断向前移动,我们逐渐遍历了所有发送图案的误差值。假设查找表索引 $i$ 中存入数据个数为 $N(i)$ ,则对应位置差值的平均值可以更新为:

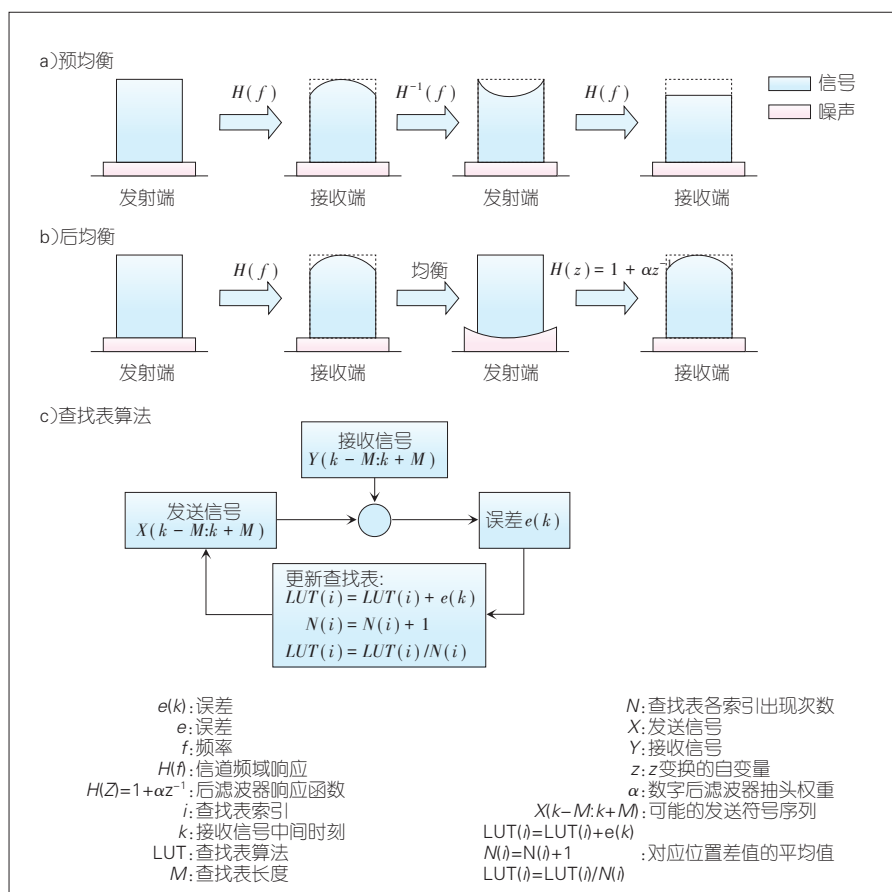
$$\begin{aligned} LUT(i) &= LUT(i) + e(k) \\ N(i) &= N(i) + 1 \\ LUT(i) &= LUT(i) / N(i) \end{aligned} \quad (1)$$

最后,将平均后的误差值在发射端对数据进行预畸变,以补偿器件的非线性损伤。这一方法的缺点是,存储空间会随着序列长度指数增长。

### 1.3 相关光发射器件的发展趋势

在这一小节,我们将介绍一些适用于数据中心光互连器件的发展趋势。

(1)单模 VCSEL。850 nm 波段的 VCSEL 和多模光纤已经被广泛地应用于数据中心内部实现单通道 10 Gbit/s 光互连应用。然而,未来的高速光互连需要达到单通道速率 100 Gbit/s 以上,并支持 300 m 的传输距离。即使采用高带宽的 OM4 型多模光纤,模式色散在这一距离下仍将成为限制因素。为此,已有的解决方案一种是减少 VCSEL 激发的纵模数量实现单模工作模式,另一种是通过氧化物孔径工程使得高阶纵模式泄露出去<sup>[15]</sup>。基于单纵模 VCSEL, WU B. 等人实验演示了



▲图3 高速数字信号补偿算法

100 Gbit/s 的 DMT 信号传输 300 m 长的 OM4 光纤<sup>[16]</sup>。R. PUERTA 等人的实验演示了 107.5 Gbit/s 单模 VCSEL 传输 100 m 的 OM4 光纤,作为对比,相同速率采用多模 VCSEL 只能达到 10 m 的传输距离<sup>[17]</sup>。2017 年,C. KOTTKE 等人实验演示了创纪录的 113 Gbit/s DMT 信号传输 550 m OM4 光纤<sup>[18]</sup>。

(2) 双边电吸收调制器。由于自身的技术成熟度,以及小尺寸、大带宽和高消光比等优势,电吸收调制器在短距离传输系统中得到了广泛应用。一般来说,电吸收调制器只有一个被调制的输出信号,另一个往往用于性能监测控制。在 2016 年,M. THEURER 等人通过集成两个电吸收调制器实现了同一波长上的双边输出模式。基于这一光源,M. THEURER 等人实验演示了可以适用于多通道短距离传输应用的 2×56 Gbit/s 不归零码(NRZ)信号生成<sup>[19]</sup>。为了适应高阶调制格式,双边电吸收调制器可以通过两路二进制驱动信号的叠加产生 PAM4 调制信号,从而避免了高速 DAC 和线性电放大器的需求<sup>[20]</sup>。进一步地,由于双边电吸收调制器输出波长相同,因此可以产生偏振复用信号。在这一方面,ZHONG K.P. 等人成功演示了 120 GBaud 的偏振复用 NRZ 信号的产生和传输<sup>[21]</sup>。

(3) 硅基强度调制器。不同于前 2 种方案,基于硅基集成的外调制方案也具有低成本、小尺寸、互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容等优势。由于强度调制器的差分输入可以避免啁啾的产生,这种方案具

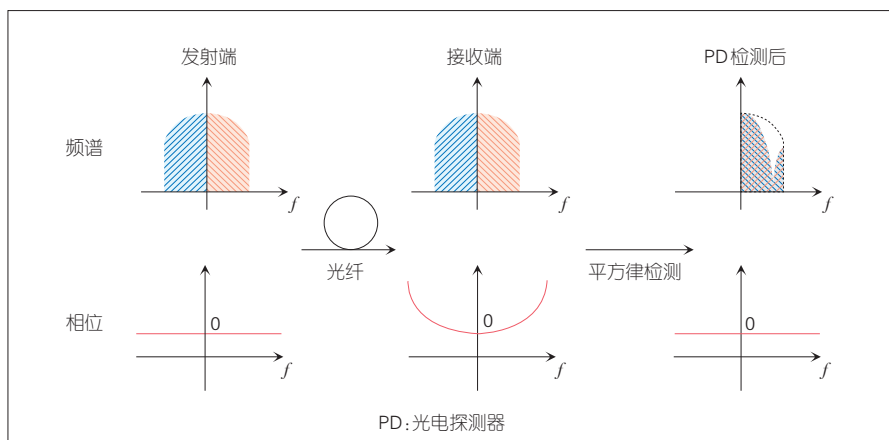
有最高的调制线性度。2018 年,北京大学 ZHANG F. 等人基于数字后均衡算法补偿器件和光纤链路的带宽不足,同时利用 22.5 GHz 带宽的硅基强度调制器实现了纪录性的 200 Gbit/s 的 PAM6 信号背靠背生成和 176 Gbit/s 的 PAM4 信号传输 1 km 标准单模光纤<sup>[22]</sup>。

## 2 数据中心之间光互连

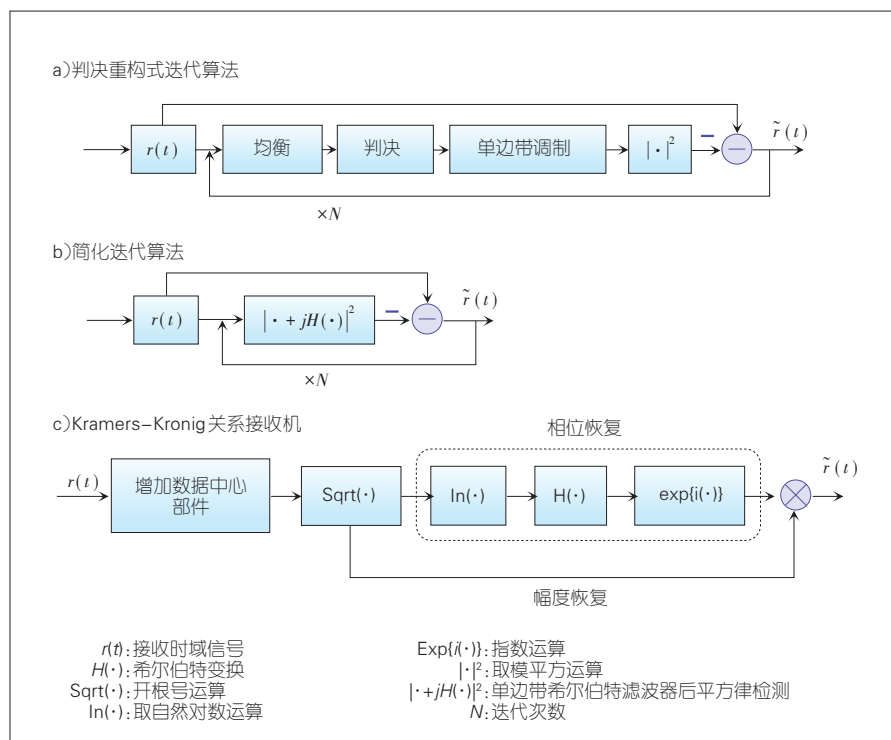
数据中心之间光互连典型传输距离 20 ~ 80 km。如图 4 所示,对于强度调制信号,在光纤传输的过程中,信号由于色散受到的相移正比于传输距离以及相对于中心频点频率的平方,因此左右边带的相移相同。而在 PD 平方律检测之后,信号会与其共轭分量相叠加,从而将色散由相位影响转化成幅度上的影响,最终导致频率选择性的功率衰落。为避免色散功率衰落效应,近年来学术界提出采用单边带调制信号作为中短距高速传输方案。

基于单探测器的光单边带传输系统,面临的主要问题是探测器对信号的平方律操作带来的信号-信号拍频串扰(SSBI)。为补偿这一损

伤,学术界陆续提出了几种有效的数字域补偿方案。如图 5 所示,英国的伦敦大学学院(UCL)大学研究组提出 SSBI 当作微扰项进行重构式迭代补偿<sup>[23]</sup>。对接收到的信号进行信道均衡和判决解调后,重新进行调制以模拟发送信号,经过时刻同步后,对该信号进行取模和平方操作重构出 SSBI 损伤项,再与原始接收信号作差以抑制 SSBI 的影响。整个步骤可以迭代进行,从而逐步提高 SSBI 估计的精确度,实现线性接收。这一方法的缺点在于,迭代过程包含了均衡、解调和调制等步骤,计算复杂度较高。作为改进,美国诺基亚贝尔实验室<sup>[24]</sup>和北京大学研究组<sup>[8]</sup>提出了不包括均衡的迭代算法。将输入信号通过单边带滤波器、取模和平方操作直接重构出 SSBI 项,并通过多次迭代增加重构精度,相比于前一种方案大幅降低了计算复杂度。然而,由于单边带滤波器需要由希尔伯特滤波器实现,所以每次要进行一对傅里叶变换(FFT)和逆变换(IFFT),所以迭代过程的复杂度仍然较高。意大利 L'Aquila 大学研究组基于最小相位



▲ 图 4 色散功率衰落效应原理示意图



▲ 图5 信号-信号拍频串扰补偿算法流程图

条件,证明了单边带信号的对数幅度和相位间满足克拉默-克隆尼格(KK)关系,即互为希尔伯特变换对<sup>[25]</sup>。如图5所示,根据接收到光电流可以恢复出接收光场的幅度分量,进而得到相位信息,最终线性重构出复数光场。KK关系接收机给出了理论上最佳的接收算法,它的缺点是算法中包含了对数等非线性操作,使得信号频谱在这一过程中发生展宽,因此接收端一般需要3倍以上符号率的上采样倍数。

在KK关系接收机提出之后,许多研究组对其加以改进以进一步降低复杂度。韩国KAIST研究组通过对对数函数进行一阶展开,避免了非线性运算,降低接收端采样率的要求。在112 Gbit/s单边带OFDM信号80 km标准单模光纤的传输实验中,他们用2倍上采样取

得了与6倍上采样相似的误码性能<sup>[26]</sup>。另一种思路是从简化希尔伯特滤波器的角度出发,德国光量子研究所提出用有限长抽头滤波器进行近似<sup>[27]</sup>,从时域卷积避免了整个数据的FFT/IFFT变换,降低了处理时延和计算复杂度。在实验中,他们利用32个抽头的数字滤波器实现了KK关系接收机,并成功地将80 Gbaud的16 QAM信号传输了300 km标准单模光纤。此外,上海交大研究组通过将指数操作移到发射端,降低了信号的KK关系接收机对单边带信号的载波信号功率比(CSPR)需求<sup>[28]</sup>。在CSPR为12 dB的虚载波单边带传输实验系统中,可以获得2 dB的接收功率灵敏度增益。

在单边带信号的基础之上,为了进一步提高传输速率和频谱效

率,华为研究组提出了孪生单边带调制方案。在具体实现时,基于单个双驱动调制器可以在左右边带同时传送不同信息,它们共享中间的光载波,从而实现传输容量的翻倍<sup>[29]</sup>。而孪生单边带的一个难点是接收端光滤波器不够陡峭,残余对向边带在PD平方律检测后会与目标边带重叠,产生串扰影响误码性能。因此,华为研究组<sup>[30]</sup>和复旦大学研究组<sup>[31]</sup>对左右边带信号进行2×2联合均衡消除边带间串扰。此外,北京大学研究组提出了非对称孪生单边带方案,可以节省其中一个边带的保护间隔并获得更小的边带间串扰,在接收端可以避免联合均衡,提升系统灵活性。在实验中,他们分别演示了224 Gbit/s的非对称孪生单边带16 QAM信号最远传输距离240 km,以及基于32 QAM调制格式实现了80 km标准单模光纤传输最大速率300 Gbit/s<sup>[32]</sup>。对称和非对称孪生单边带接收原理示意具体如图6所示。

### 3 结束语

随着各类宽带业务的不断发展,数据中心面临着前所未有的流量增长需求。下一代的光模块既要在硬件上增大收发端器件的调制带宽,又要考虑通过引入DSP,弥补收发机的非线性等问题,实现动态、灵活、精细的补偿。光电器件性能大大减轻DSP的压力,而DSP也能弥补器件的不足。此外,未来面向1.6 T以上的接口标准升级时,单一增大器件带宽变得非常困难,需要考虑更高维度、更高频谱效率的调



▲图6 对称和非对称单生单边带接收原理示意图

制方案,低成本相干可能走进数据中心内部,成为具有竞争力的一大技术方案。

#### 参考文献

- [1] Cisco.Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016 – 2021 White Paper[R]
- [2] ZHONG K P, ZHOU X, HUO J H, et al. Digital Signal Processing for Short-Reach Optical Communications: A Review of Current Technologies and Future Trends[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 377. DOI: 10.1109/jlt.2018.2793881
- [3] ZUO T, ZHANG L L, ZHOU J, et al. Single Lane 150-Gb/s, 100-Gb/s and 70-Gb/s 4-PAM Transmission over 100-m, 300-m, and 500-m MMF Using 25-G Class 850nm VCSEL[C]// ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication. USA: IEEE, 2016: 974-976
- [4] XIE C J, DONG P, RANDEL S, et al. Single-VCSEL 100-Gb/s Short-Reach System Using Discrete Multi-Tone Modulation and Direct Detection[C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2015. DOI:10.1364/ofc.2015.tu2h.2
- [5] PUERTA R, AGUSTIN M, CHORCHOS L, et al. 107.5 Gb/s 850 nm Multi- and Single-Mode VCSEL Transmission over 10 and 100 m of Multi-Mode Fiber[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). USA: IEEE
- [6] ZHONG K P, ZHOU X, WANG Y G, et al. Amplifier-Less Transmission of 56Gbit/s PAM4 over 60km Using 25Gbps EML and APD [C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.tu2d.1
- [7] CHE D, HU Q, SHIEH W. Linearization of Direct Detection Optical Channels Using Self-Coherent Subsystems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 516. DOI:10.1109/jlt.2015.2510624
- [8] ZOU K H, ZHU Y X, ZHANG F, et al. Spectrally Efficient Terabit Optical Transmission with Nyquist 64-QAM Half-Cycle Subcarrier Modulation and Direct Detection[J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2767. DOI:10.1364/ol.41.002767
- [9] LI Z, ERKILINC M S, SHI K, et al. SSBI Mitigation and the Kramers – Kronig Scheme in Single-Sideband Direct-Detection Transmission with Receiver-Based Electronic Dispersion Compensation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 1887. DOI:10.1109/jlt.2017.2684298
- [10] CHEN X, ANTONELLI C, CHANDRASEKHAR S, et al. 218-Gb/s Single-Wavelength, Single-Polarization, Single-Photodiode Transmission over 125-Km of Standard Singlemode Fiber Using Kramers-Kronig Detection[C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.th5b.6
- [11] LE S T, SCHUH K, CHAGNON M, et al. 8 × 256Gbps Virtual-Carrier Assisted WDM Direct-Detection Transmission over a Single Span of 200km[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2017. DOI:10.1109/ecoc.2017.8346088
- [12] ZHANG J W, YU J J, CHI N, et al. Time-Domain Digital Pre-Equalization for Band-Limited Signals Based on Receiver-Side Adaptive Equalizers[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20515. DOI:10.1364/oe.22.02051
- [13] LI J Q, TIPSUWANNAKUL E, ERIKSSON T, et al. Approaching Nyquist Limit in WDM Systems by Low-Complexity Receiver-Side Duobinary Shaping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(11): 1664. DOI: 10.1109/jlt.2012.2190972
- [14] REZANIA A, CARTLEDGE J C. Transmission Performance of 448 Gb/s Single-Carrier and 1.2 Tb/s Three-Carrier Superchannel Using Dual-Polarization 16-QAM with Fixed LUT Based MAP Detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4738. DOI:10.1109/jlt.2015.2467187
- [15] SHCHUKIN V, LEDENTSOV N N, KROPP J, et al. Single-Mode Vertical Cavity Surface Emitting Laser Via Oxide-Aperture-Engineering of Leakage of High-Order Transverse Modes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(12): 990. DOI: 10.1109/jqe.2014.2364544
- [16] WU B, ZHOU X, MA Y, et al. Single-Lane 112Gbps Transmission over 300 m OM4 Multimode Fiber Based on a Single-Transverse-Mode 850 nm VCSEL[C]// Processing on European Conference on Optical Communication. Germany: ECOC, 2016:1148-1150
- [17] PUERTA R, AGUSTIN M, CHORCHOS L, et al. Effective 100 Gb/s IM/DD 850-Nm Multi- and Single-Mode VCSEL Transmission through OM4 MMF[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 423. DOI:10.1109/jlt.2016.2625799
- [18] KOTTKE C, CASPAR C, JUNGnickel V, et al. High Speed 160 Gb/s DMT VCSEL Transmission Using Pre-Equalization[C]// Optical Fiber Communication Conference. USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w4i.7
- [19] THEURER M, WANG Y, ZENG L, et al. 2 × 56 GB/s from a Double Side Electroabsorption Modulated DFB Laser[C]// Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California. USA: OSA, 2016. DOI: 10.1364/ofc.2016.tu3d.6
- [20] THEURER M, ZHANG H Y, WANG Y, et al. 2

- × 56 GB/s from a Double Side Electroabsorption Modulated DFB Laser and Application in Novel Optical PAM4 Generation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 706. DOI:10.1109/jlt.2016.2597962
- [21] ZHONG K P, ZHOU X, WANG Y G, et al. Transmission of a 120-GBd PM-NRZ Signal Using A Monolithic Double-Side EML[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28 (20): 2176. DOI:10.1109/pt.2016.2586524
- [22] ZHANG F, ZHU Y, YANG F, ZHANG L, et al. Up to Single Lane 200G Optical Interconnects with Silicon Photonic Modulator [C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2019: Th4A.6. USA: OSA, 2019
- [23] LI Z, ERK, L, NÇ M S, PACHNICKE S, et al. Signal-Signal Beat Interference Cancellation in Spectrally-Efficient WDM Direct-Detection Nyquist-Pulse-Shaped 16-QAM Subcarrier Modulation[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23694. DOI:10.1364/oe.23.023694
- [24] RANDEL S, PILORI D, CHANDRASEKHAR S, et al. 100-Gb/s Discrete-Multitone Transmission over 80-km SSMF Using Single-Sideband Modulation with Novel Interference-Cancellation Scheme[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2015. DOI:10.1109/ecoc.2015.7341665
- [25] MECOZZI A, ANTONELLI C, SHTAIF M. Kramers-Kronig Coherent Receiver[J]. Optical, 2016, 3(11): 1220. DOI:10.1364/optica.3.001220
- [26] BO T W, KIM H. Kramers-Kronig Receiver Operable without Digital Up Sampling[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 13810. DOI: 10.1364/oe.26.013810
- [27] FULLNER C, WOLF S, KEMAL J, et al. Transmission of 80-GBd 16-QAM over 300 km and Kramers-Kronig Reception Using a Low-Complexity FIR Hilbert Filter Approximation[C]// 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). USA: IEEE, 2018
- [28] AN S, ZHU Q, LI J, et al. Modified KK Receiver with Accurate Field Reconstruction at Low CSRR Condition[C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019. USA: OSA, 2019: M1H.3
- [29] ZHANG L, ZUO T, ZHANG Q, et al. Transmission of 112Gb/s+ DMT over 80-km SMF Enabled by Twin-SSB Technique at 1550nm[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ECOC.2015.7342027
- [30] ZHANG L, ZUO T, ZHANG Q, et al. Single Wavelength 248-Gb/s Transmission over 80-km SMF Based on Twin-SSB-DMT and Direct Detection[C]// ECOC 2016 - 42nd European Conference on Optical Communication. Germany: VDE, 2016:133-135
- [31] WANG Y, YU J, CHIEN H, et al. Transmission and Direct Detection of 300-Gbps DFT-S OFDM Signals Based on O-ISB Modulation with Joint Image Cancellation and Nonlinearity-Mitigation[C]// ECOC 2016 - 42nd European Conference on Optical Communication. Germany: ECOC, 2016: 142-144
- [32] ZHU Y X, RUAN X K, ZOU K H, et al. Beyond 200G Direct Detection Transmission with Nyquist Asymmetric Twin-SSB Signal at C-Band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(17): 3629. DOI:10.1109/jlt.2017.2718098

## 作者简介



张帆, 北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师, IEEE 高级会员, 美国光学学会高级会员, 中国通信学会高级会员, 洪堡学者; 研究方向包括高速光传输、光互连和光子器件; 发表论文 150 余篇。



朱逸箫, 北京大学信息科学技术学院在读博士研究生; 研究方向包括中短距高速光传输; 发表论文 30 余篇。

## 专题预告

## 《中兴通讯技术》2020 年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	C-V2X 与智能车联网技术	中国移动研究院首席科学家 易芝玲 中国移动研究院高级工程师 潘成康
2	智能化通信应用芯片技术	中国科学院半导体研究所副所长 祝宁华
3	5G 核心网技术与挑战	工业和信息化部科技委信息网络专家组组长 赵慧玲
4	无线网络空中计算	中国科学技术大学教授 卫国
5	网络人工智能技术	电子科技大学教授 虞红芳
6	工业互联网技术与应用	中国信息通信研究院副总工 续合元

# 数据中心光交换技术研究的现状与挑战

## Optical Switching for Data Center: Current Status and Challenging

郭秉礼/GUO Bingli, 黄善国/HUANG Shanguo

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China)



**摘要:** 对构建下一代灵活数据中心互连网络的问题,提出了结合不同维度光交换技术的光电混合互连网络搭建思路,使未来数据中心网络具备动态拓扑重构、灵活带宽调整等特性,可以有效应对数据中心发展中由于硬件重构、业务多样等趋势导致的业务突发性强、通信模式差异大等问题。同时,在光电混合互连网络的构建与实用化过程中,仍需在智能控制体系架构、高速突发接收、低延时与低抖动控制等方面取得突破。

**关键词:** 数据通信; 数据中心; 光交换; 拓扑重构

**Abstract:** In this paper, a hybrid optical and electrical interconnection network with multi-dimension of optical switching technologies is proposed for the construction of next generation flexible data center interconnection network. The future data center network (DCN) has the characteristics of dynamic topology reconfiguration and flexible bandwidth adjustment which can effectively deal with the problems such as traffic burstness and various communication pattern due to hardware disaggregation and service diversification. At the same time, there are still lots of technique bottlenecks that need to be broken, including intelligent network control system, high speed optical burst receiver and low latency and low jitter network control system in the approach of building the optical/electrical hybrid interconnection network.

**Key words:** data communication; data center; optical switching; topology reconfiguration

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190929.1636.002.html>

网络出版日期: 2019-09-30

收稿日期: 2019-08-16

视频业务、在线游戏等个人业务快速兴起与云计算/大数据为代表的企业互联网业务的强势推广,对目前数据服务过程中的计算、交互与存储能力提出了前所未有的挑战。同时,随着人工智能和机器学习等计算密集型服务的繁荣,也极大地提高了对数据计算、存储执行效率与资源利用率的要求。在传统技术手段中,往往通过增加数据中心(DC)空间来容纳更多的

机架和服务器,进而达到增加数据处理能力的目的。然而,随着业务需求的增加,线性扩容系统的方式使数据中心正在逼近能耗极限,目前需要寻找新的技术手段来最大限度地提高计算能力和效率。在节点算力与使用效率的提升方面,信息技术(IT)领域的研究人员提出诸如硬件解耦、与高性能计算体系融合等多方面的解决方案,在本文中不再赘述,后续部分着重讨论数据中

心互连网络(DCN)方面的进展与目前面临的挑战。

在DC带宽密度提升方面,在高速率、低功耗需求的驱动下,相同容积的光模块需要具备更大的数据传输量,多通道、光子集成与混合集成技术可以将光组件做得很紧凑,顺应光模块小型化趋势,方便使用成熟自动化集成电路(IC)封装工艺,有利于量产,是未来数据中心用光模块提升带宽密度的行之有效的

技术手段。

另一方面,连接无数计算节点的互连网络承担了海量数据的传输与交换功能,不再只是一个流量转发的、仅需追求稳定的平台,它逐渐成为一个重要的生产环节。上述业务的演进趋势对数据通信中的互连网络,在时延和吞吐量方面提出了更高的要求,使数据中心网络业务承载能力的提升逐渐成为一件亟待解决的事情。本文中,我们通过分析目前 DCN 在应对突发业务与带宽灵活调度等方面面临的一些挑战,进一步探讨光交换技术在帮助 DCN 应对上述挑战中可能起到的积极作用,最后总结了光电混合 DCN 可行性及其仍需解决的一些技术难题。

## 1 数据中心互连网络面临的主要挑战

目前 DC 通过电交换设备形成各种形态的互连拓扑,把大量通用服务器互连。随着 DC 规模的急速增加以及服务器性能的提升,近年来的接入路由器和核心路由器端口速率需求将会随之达到 40 Gbit/s 和 400 Gbit/s。然而如图 1 所示,电交换机的能效随着交换容量的增大而无法继续提升<sup>[1]</sup>,这使得数据中心在能耗、带宽提供这两方面遇到瓶颈。DC 亟须解决能耗问题带来的扩容瓶颈,才能以合理的功耗继续提升网络带宽。有研究表明 DC 中 99% 的链路利用率不足 10%<sup>[2]</sup>,同时欧盟 FP7 框架下开展的面向光通信的数据速率和功率感知的自适应收发器(ADDAPT)项目<sup>[3]</sup>的研究显示,

某些 DC 中链路无效数据传输时间高达 90%,IBM 研究人员通过实验测试指出光模块具有快速启动与突发接收功能时能耗可节省 85%。因此,如何提高 DC 系统能效,需要突破现有框架,从 DC 业务特点出发,探索新的思路。

DC 承载业务类型多样,流量分布不均且具有很强的突发性<sup>[4]</sup>,现有 DCN 流量工程机制复杂,无法快速应对流量的波动。一些热点机架承载着数据中心中绝大部分的流量<sup>[4]</sup>,造成热点机架间的路径出现拥塞,端到端数据延时加大,而其他位置的网络资源却处于闲置状态。互联网协议(IP)层带宽调度技术又过于复杂,无法满足 DC 业务时效性和网络运维灵活性的需求。上述情况造成了互连带宽的浪费,限制了整个数据中心的吞吐量与业务承载能力。

近年来以 Facebook 等互联网巨头为代表的数据中心用户希望通过硬件解耦<sup>[5]</sup>,即在硬件层将同类资源聚合为资源池,如中央处理器(CPU)池、内存(Memory)池、存储(Storage)池,然后根据应用的需求分配具备相应特性的资源组合,来

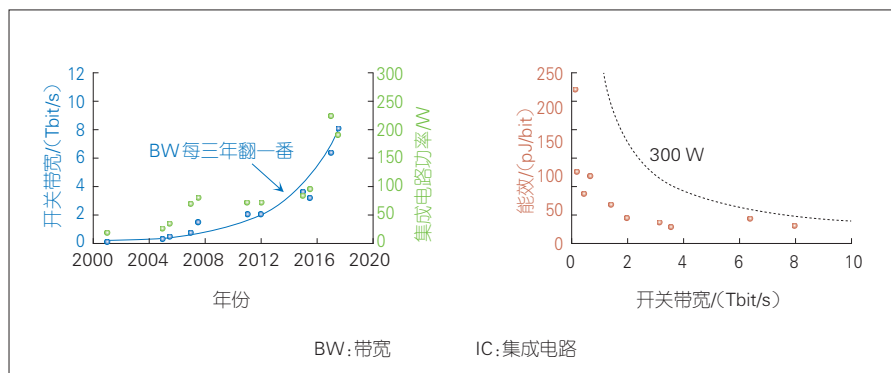
提高 DC 中资源的利用率和灵活性,同时降低资本性支出(CAPEX)和运营成本(OPEX)。资源池间互连网络的带宽提供能力(大瞬时带宽、低延时、高动态)是决定资源解耦范围的关键因素之一。因此,全局资源调度与高效网络重构能力也是硬件解耦等数据中心技术演进趋势对 DCN 提出的新要求。

为了应对上述挑战,DC 互连网络亟须在能效提升和带宽资源灵活调度方面寻找新的解决思路。由于光交换技术具有速率透明、低功耗、可重配置等优势,基于光交换的互连网络被认为是一种解决 DC 面临的问题的有效方法,以满足 DC 日益增长的高带宽、低延迟和高能效等方面的需求。

## 2 光交换相关技术的发展现状与挑战

### 2.1 光交换矩阵技术发展现状

光交换矩阵可以实现光束在时间、空间、波长等维度上的切换,是光通信、光计算机、光信息处理等光信息系统的核心器件。通常来说,光交换矩阵的性能由开关单元、切



▲ 图1 电分组交换专用集成电路能效随带宽的变化<sup>[2]</sup>

换机制和互连结构等多方面因素决定。**表 1** 中,我们对目前具备商用可能性的光交换矩阵的相关性能进行了分析比较。其中,基于微机电系统(MEMS)和波束控制(Beam-Steering)的开关矩阵已经达到商用成熟阶段,规模已经可以达到数百端口;纳秒级切换时间的光交换矩阵规模仍较小,依赖于模块多级级联,因此插损偏高。在近年来的光交换矩阵的研究中,研究人员在驱动集成、片上放大、偏振不敏感方面做了大量的研究,结果表明光交换矩阵整体向着高可靠、低损耗、小功耗、小体积以及大规模方向发展。同时,近几年光交换矩阵在电信领域(光传送网(OTN)建设中需要构建大量的可重构型光分插复用器(ROADM)、光交叉连接(OXC)节点,光交换矩阵是搭建这些节点的基础模块)、网络测试领域有大规模

应用的趋势。

### 2.2 光收发节点技术

在传统的点对点光纤通信或光电路交换(OCS)系统中,光接收机一般接收另外一个固定节点发送的连续模式光信号,并从中检测出电信号。使用快速光交换的收发系统,是因为光信号的非连续性:除了满足传统光接收机所要求的高灵敏度外,还要有较大的动态范围和快速的响应能力,即突发模式接收技术。光突发模式接收机主要由信号整形、突发同步和数据恢复 3 大部分组成。**表 2** 中,我们对传统接收机与突发模式接收机相关性能要求进行了比较。其中,对于突发模式信号,两相邻突发分组信号间有相位突变。在这种情况下,要避免使用传统的交流耦合方式。因光接收机在交流耦合之后,要对信号进一

步放大,再进行整形和判别输出;而突发信号的不均衡,其直流成分(均值)发生漂移,要影响到后面放大器的直流工作点,使其不能稳定工作。此外,判决电路对幅度不均衡信号进行判决时,要么会出现小信号的丢失,要么会出现大信号的脉宽失真。上述原因都是研制高速突发接收模块的需要解决的技术难题。

目前,商用的突发模式光接收机主要应用在各种各样的无源光网络(PON)中,支持 1.25 Gbit/s 以及 10 Gbit/s 的速率。电子设备工程(EEE)下一代以太网无源光网络(NG-EPON)正致力于 25 Gbit/s 单波长和 50 Gbit/s 双波长的解决方案。这与最近数据中心传输速率从 10 Gbit/s 迅速转变为 25 Gbit/s 的趋势是一致的<sup>[6]</sup>。近来,针对高速光突发模式接收机的研究也取得了一些进展。IBM 在国际晶体管电路讨论会(ISSCC)2015 上报导了突发模式时钟和数据恢复(BM-CDR)以 25 Gbit/s 的速率在 18.5 ns 锁定时间下的成功演示实验<sup>[7]</sup>。IBM 和瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)在国际固态电路(ISSCC) 2018 上报导了使突发模式光接收机(BM-Optical RX)从 10 Gbit/s 提高到 56 Gbit/s 的实验,该实验演示 56 Gbit/s BM-Optical RX 通过链接协议完成 384UI(6.8 ns)中的唤醒和 CDR 锁定<sup>[8]</sup>。在 2018 年光纤通信展览会及研讨会(OFC)上,IBM 报道了一种由 850 nm 光电二极管(PD)阵列组成的、以低成本垂直腔面发射激光器(VCSEL)为基础的、14 nm 互补金属氧化物(CMOS)的 4×40 Gbit/s

▼表 1 采用不同技术的光开关性能比较

	MEMS 开关	波束控制开关	LCoS 开关	铌酸锂光电开关	半导体放大器开关	热光开关
开关时间	~20 ms	~ 20 ms	>100 ms	~ ns	~ ns	~10 ms
插损	中等	低	高	高	中等	低
能耗	中等	低	高	高	低	低
稳定性和可扩展性	高	高	中等	中等	中等	低
端口数	320 × 320	384 × 384	1 × 20	32 × 32	16 × 16	8 × 8
可靠性	低	低	高	高	中等	高
成本	中等	中等	低	高	高	低
LCoS:硅基液晶			MEMS:微机电系统			

▼表 2 传统接收机与突发模式接收机比较

接收机类型	传统光接收机	突发模式光接收机
耦合方式	交流	直流
判决门限建立方式	固定	动态
幅度和时钟恢复时间	微秒	纳秒

2 pJ/bit 光接收器(RX)。该 RX 可以实现低至 8 ns 的 Power-on 和 CDR-Lock 时间<sup>[9]</sup>。综上所述,高速光突发模式接收机的相关技术研究也得到了显著进步,有望支撑未来 100 G 以内光突发接收模块的相关研制。

### 2.3 全光交换网络相关技术

依赖于不同维度的光开关器件的研究进展,基于光交换的 DCN 近年来得到广泛关注,包括 IBM、Google 在内的大量企业与研究机构在数据中心内也进行了大量的尝试与实验。表 3 和表 4 为目前业界主要的主要光互连方案在技术特性、成熟度等方面的比较。其中,开放式可插拔规范(OPS)、光突发交换

技术(OBS)需要复杂的冲突避免机制,需要在光缓存器件、光逻辑器件等方面进行技术突破;光电路交换(OCS)相关技术的成熟度较高,光时隙交换次之,光时隙交换系统依赖于快速光交换器件;收发模块方面,除 OCS 外,其他交换机制的实现均依赖于突发模式收发技术。综上所述,光时分复用(OTDM)系统在数据延时、控制时效性等方面有一定的优势,混合波分复用(WDM)的 OTDM 系统可以作为一种实现数据中心内动态光互连拓扑重构的可行方案;而 OCS 机制适合于可以提前预知流量变化的场景。

## 3 光电混合 DCN 发展趋势

大量研究显示,全光交换技术

在特定场景下比电交换技术在能效等方面有一定的优势,但无法全面替代电交换技术细粒度的业务调度能力,所以如何设计光电混合的 DCN 成为目前业界所研究的重点。需要充分发挥各自的一些优势,使其能够适应 DC 内多样、突发的业务流量。

### 3.1 数据中心内业务特征

数据中心网络业务的第 1 个特征是南北向流量与东西向流量的“二八定律”。在数据中心发展的早期,出于用户对服务器上大容量存储数据的访问需求,大量流量流向机架外部,然而随着互联网和云产业的迅猛发展,现阶段的数据中心中,这种南北向流量已降低至 20% 左右<sup>[10]</sup>。预计到 2021 年,94% 的工作负载和计算实例将由云数据中心处理;传统数据中心处理的比例仅为 6%<sup>[11]</sup>。在新兴的云数据中,应用和其所依赖的组件大多部署在同一个机架内,网络流量具有明显的特征:75% 以上的流量停留在机架内部,核心链路利用率低于 25%<sup>[12]</sup>。

数据中心网络的第 2 个特征是大象流与老鼠流的混合。一个数据中心通常需要承载各种各样的业务,为用户提供包括网页搜索、直播视频、基于 IP 的语音传输(VoIP)、数据存储、资源下载、即时通信等丰富多彩的云服务。这些应用程序产生的流量具有不同的特征,可以根据其传输数据量的多少分为大象流和老鼠流。大象流通常产生自带宽敏感型业务,例如数据库同步、存储

▼表 3 不同光交换技术各方面特性比较

交换技术	光开关性能要求	收发模块性能要求	其他	交换粒度	控制时效性
OCS	~10 ms	连续模式	支持 WDM	波长	~200 ms, 链路端到端预约配置
OPS	~10 ns	突发模式	单波、可混合 WDM	光包	标签配合路由表转发,不依赖实时控制
OBS	~1 μs~10 ns	突发模式	单波、可混合 WDM	光突发包	信令预约时隙,实时协议交互
OTDM	~100 ns	突发模式	单波、可混合 WDM	光时隙	支持实时按需调整
OCS:光电路交换技术 OPS:开放式可插拔规范 OBS:光突发交换技术				OTDM:光时分复用 WDM:波分复用	

▼表 4 不同光交换技术成熟度对比

交换技术	光开关	收发模块	交换粒度	控制时效性
OCS	成熟度高,端口可达 512	成熟度高	成熟	控制平台与协议成熟
OPS	成熟度低,实验室端口可达 8	10 Gbit/s 突发接收技术成熟、高速突发模式亟待研究	依赖光标签处理技术	要求低
OBS			依赖光开关性能	不成熟
OTDM	成熟度中等,实验室端口可达 16		依赖光开关性能	相对成熟
OCS:光电路交换技术 OPS:开放式可插拔规范			OBS:光突发交换技术 OTDM:光时分复用	

备份、数据分析等需要占用大带宽的业务;老鼠流通常产生自时延敏感型业务,例如社交网络、搜索引擎等实时性业务。相关研究表明,传输数据量不足 1 MB 的突发性老鼠流占数据中心网络流数量的 90% 以上,而传输数据量不超过 100 MB 的老鼠流占到数据中心网络流数量的 98% 左右<sup>[13]</sup>。传输数据量大于 100 MB 的大象流的数量虽然比较少,却承载了网络中 90% 以上的数据量,即 90% 以上的流量被认为是老鼠流,而 90% 以上的数据量在大象流中。

数据中心网络的第 3 个特征是流量分布的突发性和不均匀性。局部的 hot spots 承载了大量的流量,其他地方闲置的链路造成了网络资源的浪费。有相关研究指出,数据中心网络内 86% 的链路会因为突发的大象流而产生超过 10 s 的网络拥塞<sup>[14]</sup>。

上述 DC 内的流量特征决定了 DCN 流量调度问题的复杂性以及传统互联网解决方案在应对上述一些问题时也必将会面临着大量的不适应性。

### 3.2 基于通信模式的拓扑重构

针对上述流量特征,电交换网络适合针对老鼠流进行灵活分发,而光交换网络提供了可重配置的快速光通道,为突发的大象流业务按需提供实时的高速连接。为了达到上述目的,需要在数据中心组知识平面、智能控制平面来实现流量的高效感知和光电混合网络的实时控制。

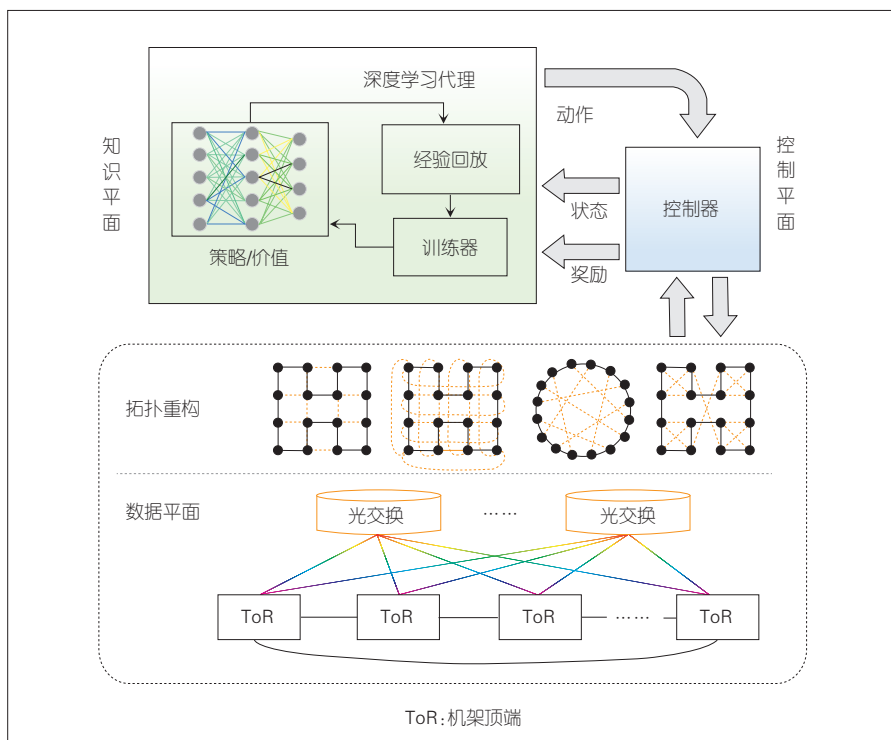
图 2 是基于 AI 流量分析的光电混合 DCN 重构体系。在该体系中,首先通过知识平面对数据中心业务进行感知与分析,可以充分利用 sFlow、NetFlow 等基于报文随机采样的网络流量监测控制技术。这些技术可以实时完整地提供全网范围的数据链路层、网络层和传输层的网络流量信息,进而对网络流量进行实时的分析与分类,从而与网络控制平面形成联动关系,然后再根据业务需求实时改变网络拓扑,在数据面实现相应流量的高效汇聚以及转发。

同时,在数据平面拓扑构造方面,通过电交换设备和点到点光链路构成 DCN 基础拓扑,使其具备基本的连通性,再通过光交换矩阵连接必要的节点,如接入层机架顶端 (ToR) 或汇聚层 ToR 构成可重构的

高速互连拓扑。

### 3.3 低延时或确定性延时控制技术

为了满足光电混合网络对动态业务实时调度的要求,需要极大提升现有网络控制平面的时效性,包括有效降低控制软件的响应时间及其抖动,降低控制消息传递时延及其抖动。传统网络控制系统(如软件定义网络控制器)响应时间随网络负载差异较大,业务响应时延基本保持在百毫秒到秒级;控制消息传递的时延与抖动也无法有效控制。如果实时网络控制系统的时延抖动过大,会引起网络协议振荡,最终导致网络稳定性变差。为了提升控制效率,软件加速技术、国际互联网工程任务组 (IETF) (DetNet)<sup>[15]</sup> 和 IEEE 802.1 时间敏感网络 (TSN) 等



▲ 图 2 基于人工智能的光电混合网络重构架构

确定性网络低延时传输技术、控制系统与收发节点的高精度时间同步技术都将是提升控制系统时效性的关键手段。

## 4 结束语

随着移动互联网业务的迅猛发展与普遍接入,用户使用各种互联网服务的行为产生了大量的数据。以5G为代表的通信网络的快速推广使得更高速的数据传输成为可能,而数据中心作为存储、处理和分析这些数据的重要基础设施,其节点算力逐渐增强,规模逐渐增大,要求数据中心互连网络具备提供高带宽、低能效、可应对突发数据的承载能力。结合不同维度的光交换技术的光电混合数据中心互连网络将成为提升目前数据中心带宽调度灵活性的关键技术手段,该技术亟待流量分析、智能与高效控制多方面取得突破。

### 参考文献

- [1] LEE G B, DUPUIS N, PEPELIJUGOSKI P, et al. Photonic Switch Fabrics in Computer Communications Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(4): 768-777
- [2] ROY A, ZENG H, BAGGA J, et al. Inside the Social Network's (Datacenter) Network[C]// SIGCOMM 2015. USA: ACM, 2015
- [3] ADDAPT, ADDAPT Project[EB/OL].[2019-07-22]. <http://www.addapt-fp7.eu/>
- [4] BENSON T, AKELLA A, MALTZ D. Network Traffic Characteristics of Data Centers in the Wild[C]//Internet Measurement Conference 2010. USA: ACM, 2010
- [5] Disaggregated Data Centers: Great Idea, But Not Just Yet[EB/OL].[2015-07-21][2019-07-22].<http://www.datacenterdynamics.com/servers-storage/disaggregated-data-centers-great-idea-but-not-just-yet/94473.fullarticle>
- [6] YIN X, KERREBROUCK V J, GOUDYZER G, et al. Multi-Level High Speed Burst-Mode Receivers[C]//Optoelectronics & Communications Conference 2016. Japan: OECC, 2016
- [7] RYLYAKOV A, PROESEL J, RYLOV S, et al. A 25 Gb/s Burst Mode Receiver for Rapidly Reconfigurable Optical Networks[C]//2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference- (ISSCC) Digest of Technical Papers. USA: IEEE, 2015:400-401. DOI: 10.1109/ISSCC.2015.7063095
- [8] OZKAYA I, CEVRERO A, FRANCESE A P, et al. A 56 Gb/s Burst-Mode NRZ Optical Receiver with 6.8ns Power-On and CDR-Lock Time for Adaptive Optical Links in 14nm FinFET CMOS [C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference. USA: IEEE, 2018:16. DOI: 10.1109/ISSCC.2018.8310286
- [9] CEVRERO A, OZKAYA I, MORF T, et al. 4x40 Gb/s 2 pJ/bit Optical RX with 8ns Power-on and CDR-Lock Time in 14nm CMOS[EB/OL].[2019-07-22]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2018-M2D.3>
- [10] Cisco. Forecast and Methodology, 2016-2021 White Paper, 2018[EB/OL].[2018-11-19][2019-07-22].<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html>
- [11] BENSON T, AKELLA A, MALTZ D A. Network Traffic Characteristics of Data Centers in the Wild[C]//Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. USA:ACM, 2010
- [12] KREUTZ D, RAMOS F M, VERISSIMO P, et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1):14-76. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999
- [13] GREENBERG A G, HAMILTON J R, JAIN N, et al. VL2: A Scalable and Flexible Data Center Network[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011,39(4): 51. DOI:10.1145/1594977.1592576
- [14] KANDULA S, SENGUPTA S, GREENBERG A, et al. The Nature of Data Center Traffic: Measurements & Analysis[C]//Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet measurement, 2009: 202. DOI: 10.1145/1644893.1644918
- [15] Deterministic Networking Architecture[EB/OL].[2019-07-22]. <https://tools.ietf.org/draft-ietf-detnet-architecture-04.html#rfc.section.4.5>

### 作者简介



**郭秉礼**, 北京邮电大学光电信息学院副教授、硕士生导师;研究方向为数据中心与高性能计算中的光互连网络技术、天地一体化网络控制技术;先后主持和参加国家自然科学基金、国家重点研发等项目20余项;发表SCI/EI论文100余篇。



**黄善国**, 北京邮电大学教授、博士生导师、理学院执行院长;研究方向为智能光网络与多维光交换技术、光网络规划与优化技术,以及高频光控波束形成;先后主持并参与10余项国家和省部级科研课题,包括国家自然科学基金、国家“863”计划、国家“973”计划合作课题等;发表SCI/EI检索论文150余篇,国际特邀报告7次,获得授权国家发明专利20项、IETF国际标准建议6篇,出版专著2部。

# 面向移动前传的大容量光接入网技术

## Emerging Technologies of High Capacity Optical Access Network for Mobile Fronthaul

李隆胜/LI Longsheng, 胡卫生/HU Weisheng

(上海交通大学, 上海 200240)  
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)



**摘要:** 针对未来移动接入网大容量低成本的前传传输需求, 提出并研究了可用于承载移动业务的高速无源光网络(PON)的新型数字均衡技术和新型调制编码方式, 设计了针对光纤承载的增强型通用公共无线接口(eCPRI)的数据压缩方案。其中, 基于强度分类的均衡器能够高效地消除传输系统非线性; 调制编码方案利用无线信号量化数据的权重差异, 在光接口处采用非均匀4电平脉冲幅度调制(PAM4)信号及比特交织映射, 提升传输鲁棒性; eCPRI上行压缩方案通过根据前传链路负载自适应调整接口的量化精度, 降低前传接口量化精度, 进而提升传输效率。

**关键词:** 前传; 移动接入网; 无源光网络; 数字信号处理; 数据压缩; 增强型通用公共无线接口

**Abstract:** To meet the requirement of the high-capacity and low-cost fronthaul transmission for the future radio access network, a novel digital equalization technology and a new modulation coding scheme for the fronthaul-carrying passive optical network (PON) are proposed, and a data compression scheme for the fiber-based enhanced common public radio interface (eCPRI) is designed. The proposed intensity-directed feed forward equalizer can effectively remove the system nonlinearity at low computational cost. For the CPRI compression, given the significance diversity of quantized bits, the uneven 4-level pulse amplitude modulation (PAM4) is adopted to reinforce the transmission robustness. As for the uplink eCPRI, the load-adaptive flexible quantization scheme is proposed to reduce quantization resolution, thereby enhancing the transmission efficiency of eCPRI.

**Key words:** fronthaul; radio access network; passive optical network; digital signal processing; data compression; enhanced common public radio interface

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190929.1642.004.html>

网络出版日期: 2019-09-30

收稿日期: 2019-07-20

**受**未来移动互联网高容量、低时延、大联接的应用场景的驱动, 第5代移动通信系统(5G)以及超5G(B5G)技术正蓬勃发展。以低成本网络提供高质量通信业务将是影响5G未来发展的关键因素。其中, 定义为终端到边缘数据中心

或核心网边缘网关的移动接入网(RAN)对于5G的性能与成本有重大影响, 也是5G众多新型网络、传输技术的目标领域<sup>[1]</sup>。以云化无线接入网(C-RAN)<sup>[2]</sup>和下一代前传接口(NGFI)<sup>[3]</sup>为代表的集中化无线接入网架构是低成本实现接入网的重要技术之一。此类架构中, 无线基带处理资源被全部或部分地集中在

中心机房侧并构成基带单元池(BBU), 而远端基站退化为射频拉远单元(RRU)且功能极大地被简化。BBU与RRU之间的通信链路被称为前传链路(fronthaul)。由于5G高空口带宽、密集布站、大规模多天线阵列等技术的演进, 前传传输的带宽开销巨大, 因此基于光纤接入网的前传承载方案的优势日益

**基金项目:** 国家自然科学基金(61501157, 61431009, 61571291)

凸显。然而,基于传统的通用共无线接口(CPRI)标准<sup>[4]</sup>,5G单站点带宽需求将达到百吉比特每秒量级<sup>[5]</sup>,这对于成本敏感的光纤接入网而言也是一大挑战。目前在接入网领域,以无源光网络(PON)为代表的直调直检短距离传输系统,由于成本低,建设、运维方便等优势受到运营商与设备商的青睐。如何基于PON传输链路的现有特点,并且针对前传业务特性实现高效传输是5G技术演进中的重要研究方向。

本文中,围绕面向前传传输的低成本大容量光接入网中的关键技术,我们介绍了该领域最新的一些相关研究成果,主要包括以下3个方面:(1)针对低成本PON系统中的啁啾等非线性效应,提出了基于强度分类的前馈/反馈均衡器;(2)针对CPRI中无线基带信号有量化比特具权重差异,比特位的误码率对于信号保真度影响程度不同设计了非均匀4电平脉冲幅度调制(PAM4)信号与比特交织映射,提升了传输系统的保真度;(3)针对极具应用前景的增强版CPRI(eCPRI),提出了根据上行数据流量动态变化的这一显著特点,负载自适应地调整前传接口量化精度的数据压缩方案。

## 1 高速低成本PON中的新型均衡技术

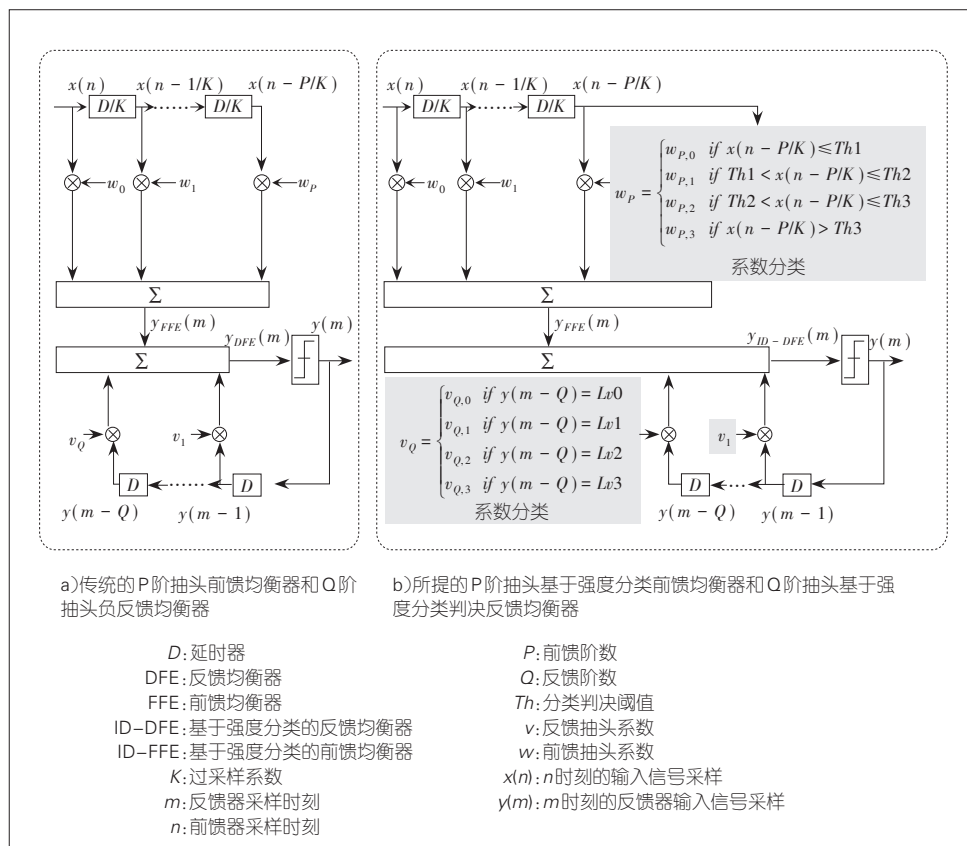
低成本直调直检系统是承载前传传输较为经济的方案,但也给前传扩容带来诸多

限制。一方面系统带宽受限,导致符号间串扰严重。传统的前馈均衡器(FFE)以及反馈均衡器(DFE)对于消除系统线性低通响应有显著作用。由于DFE与FFE相对复杂度低,以及高速芯片工艺日趋成熟,数字信号处理(DSP)的应用已成为未来PON与前传应用的一大趋势<sup>[6]</sup>。另一方面,系统所采用的直接调制激光器(DML)带来的啁啾效应,以及其他低成本非线性光、电器件的引入会使得系统有严重的非线性响应。消除非线性响应需要引入非线性均衡器,但诸如Volterra的非线性均衡器涉及信号采样值之间的高阶运算,导致其计算复杂度极高而降低了实际应用的可行性。针对此问题,我们提出了一种基于强度分类

的FFE/DFE均衡器(ID-FFE/ID-DFE)<sup>[7]</sup>,在接近线性计算复杂度的前提下,达到优于Volterra均衡器的性能。

### 1.1 ID-FFE/ID-DFE原理

基于强度分类的均衡器主要针对PAM信号,文中我们以PAM4信号分析。图1对比了传统FFE/DFE与所提ID-FFE/ID-DFE的架构。由于FFE可以视作是把反馈抽头系数全部置零的DFE,这里不失一般性地只分析DFE与ID-DFE。和DFE相同,ID-DFE均衡器先对接收信号 $x(n)$ 进行前馈均衡然后进行判决反馈均衡,其不同之处在于所提均衡器中所有抽头系数并非固定,而是有4组(对应PAM4)系数可选。



▲图1 传统FFE/DFE与ID-FFE/ID-DFE的架构对比

对于前馈抽头系数,均衡器首先对接收信号  $x(n-P/K)$  按幅度分类,根据分类切换抽头系数。对于 PAM4,需要设置 3 个门限  $\{Th1, Th2, Th3\}$  将接收信号分成 4 类,每一类信号对应的抽头系数需要单独训练,训练完成后存储为  $\{W_{p,0}, W_{p,1}, W_{p,2}, W_{p,3}\}$ 。之后在实际负载信号传输时,系统将根据当前  $x(n-P/K)$  的分类,实时更新前馈抽头系数。对于反馈均衡器系数,判决后的  $y(m)$  已经把信号分为 4 类,因此在训练系数及处理负载信号时,可以根据  $y(m)$  更新滤波器反馈抽头的系数  $\{V_{q,0}, V_{q,1}, V_{q,2}, V_{q,3}\}$ ,而不需要引入额外判决过程。

ID-DFE 中对  $x(n-P/K)$  分类的准确性会极大地影响均衡效果。当链路环境较差,直接使用 ID-FFE,其分类能力不够准确。文中我们设计在 ID-FFE/ID-DFE 前串联一个

pre-FFE 来消除部分符号间串扰 (ISI),提升判决的准确度,然后再进行 ID-FFE/ID-DFE 均衡。

## 1.2 ID-FFE/ID-DFE 实验传输结果与啁啾抑制性能

为此我们搭建了 56 Gbit/s 的高速直调直检实验传输系统,试验系统采用 PAM4 调制格式。系统发射端不涉及 DSP,所有 DSP 均为后处理。实验中,所有结果均是在驱动电信号峰峰值、DML 输出光功率最优的情况下测量得到。

图 2 给出了 0~35.9 km 下的传输结果,其中 FFE 和 ID-FFE 的阶数均为 21 阶,接收端过采样率为 2。图 2a) 中,由于 ID-FFE/ID-DFE 能消除部分系统非线性,其性能略好于 FFE/DFE,即使在 0 km 下,啁啾带来的非线性很弱。相对地,传输距离达到 35.9 km 时, ID-FFE 与

ID-DFE 性能优势凸显,且只有 ID-DFE 能满足  $2 \times 10^{-3}$  的误码门限。

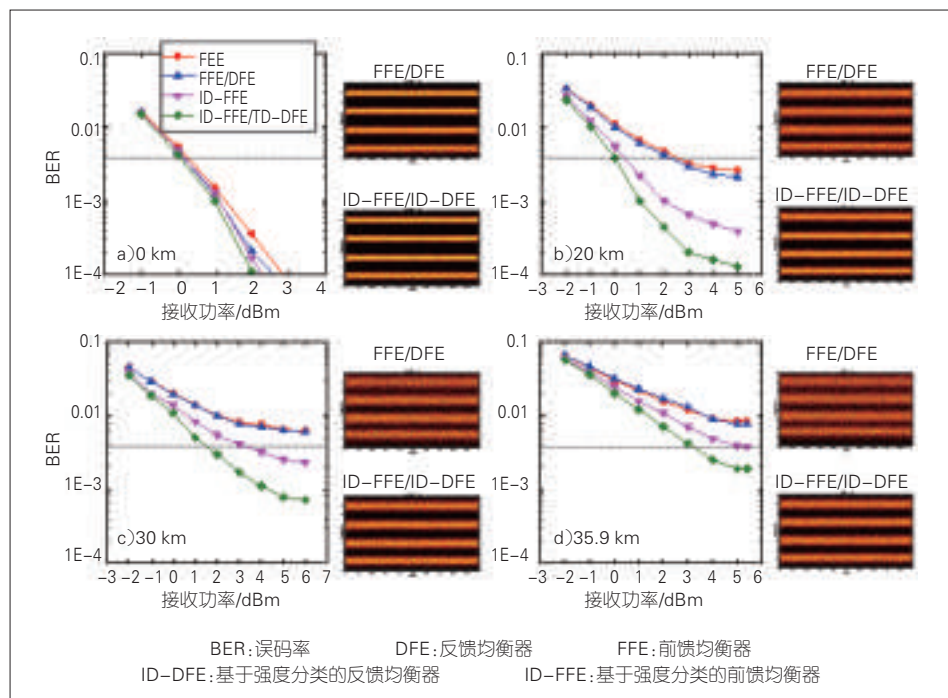
此外,进一步对比 ID-FFE/DFE 与 Volterra 的计算复杂度:以 35.9 km 来分析,1 阶和 3 阶记忆长度设为 31 和 3 (3 阶长度大于 3 时没有明显提升),此时 2 种均衡器效果相同;而此时 Volterra 所需乘法次数为 233,远大于 ID-FFE/DFE。所提的均衡器在较低复杂度下改善了低成本高速短距传输系统的性能,对前传光链路的扩容有显著效果。

## 2 承载 CPRI 业务的比特交织映射与非均匀 PAM4 光调制

### 2.1 系统原理

CPRI 接口基于 Option 7 的基带功能划分方式<sup>[8]</sup>,传输的是基带时域波形经过采样、量化、编码后的数据。量化后的数据无论是基于线性量化或者非线性量化,不同比特位对应的权重是不同的,这导致不同比特位上的误码对于基带信号的损伤程度也有不同。目前,业界的主要研究方向之一是提升单波长的传输速率。但由于低成本器件性能的限制,PAM4 类型的高阶调制格式的引入,以及更高的分光比需求,光传输链路的误码性能受到严重恶化。当传输链路无法满足无误码时,如何保持前传链路鲁棒性,将是一大挑战。本文中我们提出了一种量化比特交织映射到非均匀 PAM4 信号的方案<sup>[9]</sup>。

图 3 给出了此方案前传接



▲图 2 不同距离下的误码性能

口处的信号处理流程。模拟基带时域信号  $x(t)$  首先被模数转换器(ADC)转换为数字信号。根据 CPRI 协议,每个码字保留 15 位有效量化位数。在本方案中,15 位比特被分为高阶有效位(7 位)和低阶有效位(8 位)2 组。2 组比特位交织排列,然后根据格雷码关系映射到 PAM4 信号上,其中码字的高阶组被映射到 PAM4 信号的高有效位上(1stb),低阶组被映射到低有效位上(2stb)。从图 3 中可以看到,符号 2 和符号 3 之间(即中间眼)的误判会导致 PAM4 高有效位的错误,符号 1 与符号 2 之间以及符号 3 与符号 4 之间的误判,会导致 PAM4 低有效位错误。扩大符号 1、2 间距能够降低 PAM4 高有效比特的误码率,即降低量化码字中高阶有效位

的误码,其代价是增加低有效比特的误码,即增加低阶有效位的误码。PAM4 信号通过光路传输后,在接收端可直接通过硬判决被恢复。最后,将交织的采样比特恢复成正常的顺序,重建无线基带信号。此方案中收发机都没有采用复杂信号处理。

## 2.2 实验系统结构

为了验证所提方案在有系统误码情境下的优越性,我们设计了如图 4 所示系统实验。高阶组和低阶组的比特分别由 2 个独立的脉冲码型发生器(PPG, Keysight N4951B)产生,信号速率为 12.5 Gbaud/s,即链路速率为 25 Gbit/s。系统中外腔调制器(EML)与 PD 的 3 dB 带宽分别为 33 GHz 和 40 GHz。接收端信

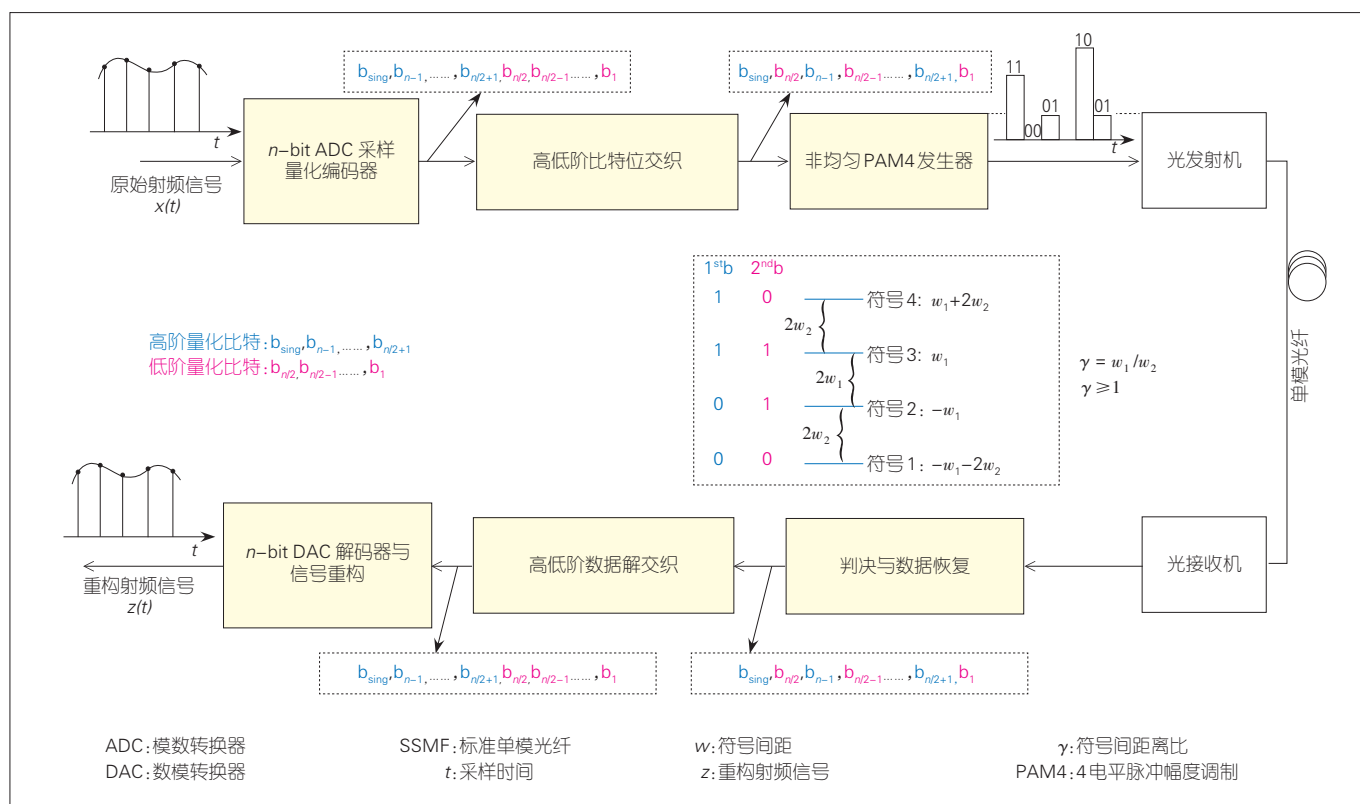
号由数字示波器(LeCroy SDA 845Zi-A)2 路二进制启闭键控(OOK)信号的峰峰值经过合理的调整,可实现不同的非均匀比例。

## 2.3 实验结果分析

图 5 中可以看到,对于 20 km 系统,当  $\gamma = 2$  时,系统性能始终是最优的。图 5c) 给出最优  $\gamma$  随接收光功率变化的结果。在 0 km 和 20 km 传输系统中,相对于传统 PAM4 方案,所提方案中信号的 EVM 分别降低 10 dB 和 13 dB。

## 3 针对 eCPRI 链路负载波动的弹性量化方案

传统的类 CPRI 前传接口划分采用的是 Option 8<sup>[8]</sup>,此方式下前传传输的负载数据是连续不断的时域

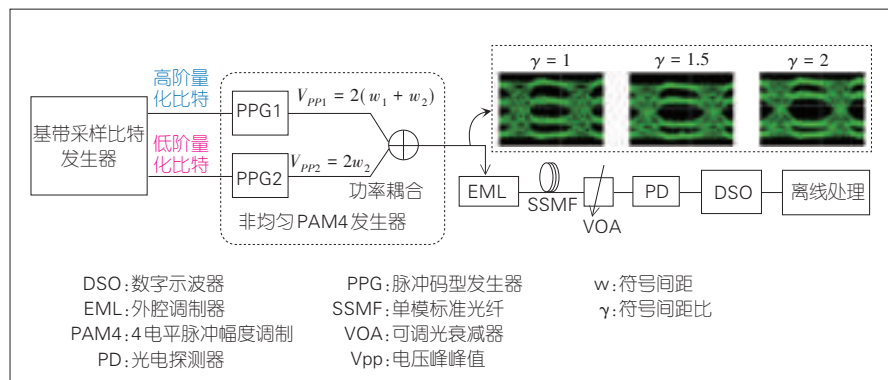


▲图 3 基于比特交织与非均匀 PAM4 的传输系统流程

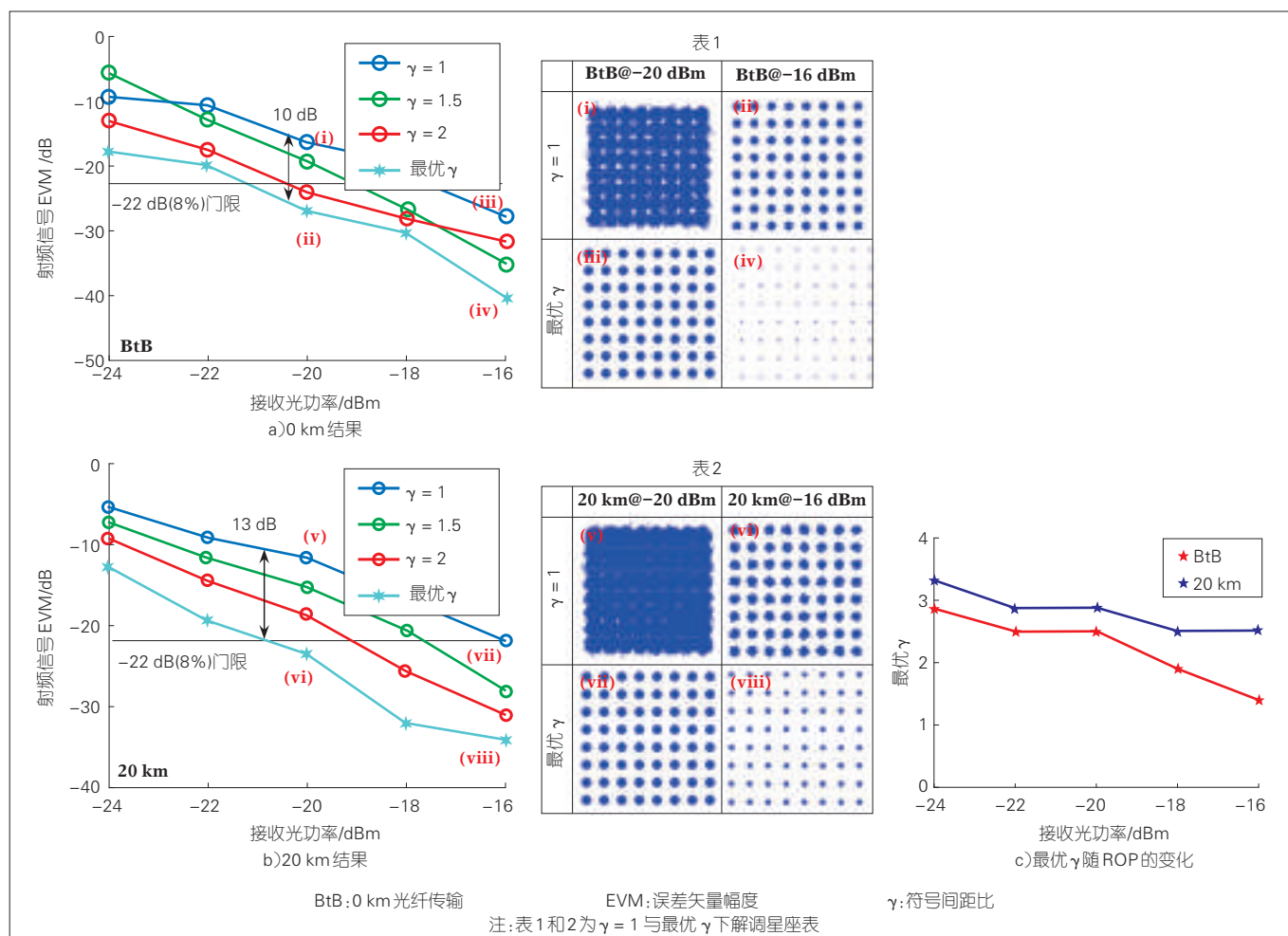
信号采样量化值,其数据量巨大,即使通过光纤传输媒介也难以满足5G应用需求。CPRI技术组提出的eCPRI标准采用了新型划分点下行

划分点1( $\Pi_b$ )和上行划分点2( $I_b$ ),分别对应上行、下行链路且二者都是基于Option7。此时链路中传递的负载信息是基带处理中间过程中

时频空间中的资源块(RB)。新的标准使前传数据量显著降低,适合工业界实际部署<sup>[10]</sup>。与CPRI不同的是,eCPRI链路数据并非持续不断,而是和实际无线终端用户负载直接相关。因此,前传接口采用eCPRI必定会带来链路负载的波动,考虑到潮汐效应等问题,负载波动极大地降低了链路平均利用率。针对此问题,我们提出了一种用于eCPRI上行接口的动态调整RB量化精度的负载自适应方案。其核心思想可以概括为:在轻负载时段采用全分辨率量化RB,量化精度根据现有报道可设为8~10 bit。当链路



▲图4 基于非均匀PAM4信号和比特交织的传输实验框图



▲图5 非均匀4电平脉冲幅度调制加比特交织方案中前传信号保真度性能测试

过载时段,通过动态减少量化精度,合理丢弃最低有效位来达到降低链路速率的目的<sup>[11]</sup>。通过此方式,链路的峰值速率能得到有效抑制,进而在光接入带宽不变的情况下,满足更大容量的无线接入(以可支持的RB数目衡量)。或者,在支持RB数目指标不变的前提下,大幅节省光传输资源。

### 3.1 eCPRI 冗余量化比特分析

和CPRI中采样量化数据类似,eCPRI上行中负载数据是对时频域的同相正交信号(IQ),或称资源格子(RE),进行采样量化。从整个无线光纤链路上来看,采样编码后的码字所包含的信息量由2部分决定:无线链路的信噪比、前传接口上的量化精度(即码字的位宽)。经过简单地推导,我们可以得到码字中每一位比特对应的信息量。

从图6中可以看到,在考虑上行空口信干噪比(SINR)的情形下,量化比特包含的信息量随有效位索引(index)增长而降低,随空口SINR增长而增加。其次,此三维图底面的白色、粉色、红色区域分别代表相比于量化前的信息量(只考虑SINR),量化后信息容量损失3%,2%,1%所需要的最少量化位宽。此结果表明对于eCPRI接口,大量的量化比特位相对来讲是冗余的,丢失这部分比特对于整体光纤无线信道容量的损失很少。因此,我们提出在高负载状态下,以传送RB/RE数目为首要目标,合理地减少量化精度。另一方面,无线网络高负载情况下,往往导致空口信号质量下降,即更多的信号趋向于分布在低SINR区间。因此,高负载下冗余比特出现的概率更高,此时采用紧

缩的量化策略更为合理。

### 3.2 基于3GPP标准系统的eCPRI弹性量化方案仿真分析

为提供可靠且具有参考价值的结果,我们基于Matlab搭建了符合第3代合作计划(3GPP)标准的无线上行物理层(PHY)与低介质访问层(Low-MAC)仿真系统,实现单用户设备(UE)的通信。其中无线信道通过5 Hz多普勒频移下的扩展步行者信道模型(EPA-5)信道传输仿真,用以实现信号与SINR随时间

变化。图7中,所提负载自适应方案(LAFQB)是以相较于固定8比特方案节省40%传输带宽为目标来设计。图7a)的映射表存储于收发端,图7b)为在典型4G站点配置下,固定8比特量化方案与所提负载自适应弹性量化方案中单个UE吞吐量的比较。可以看到,由于所提方案是一种有损压缩,在高负载情形下信号质量受到一定影响而导致单个终端速率降低,但即使是在满负载的状态下损失也只有不到2%。图7c)中线路速率,所提方案

图6 均匀量化后码字中每一位比特所包含的信息量与位数索引以及无线信干噪比之间的关系

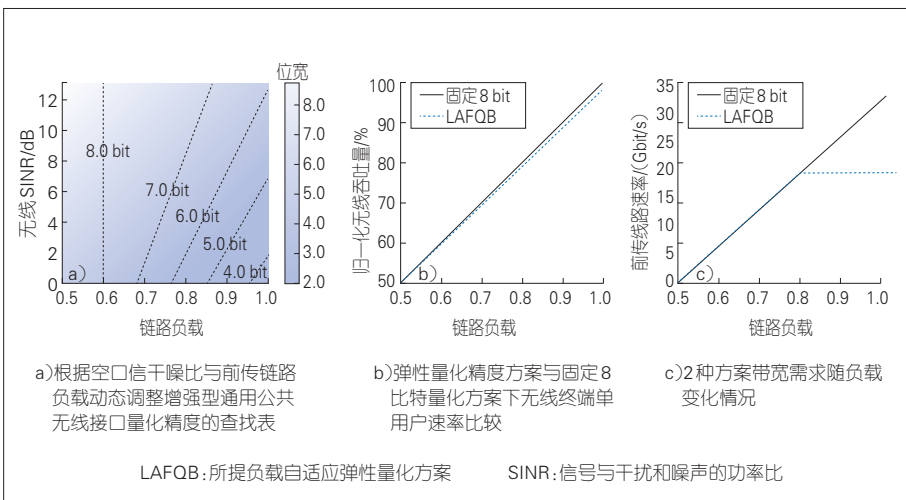
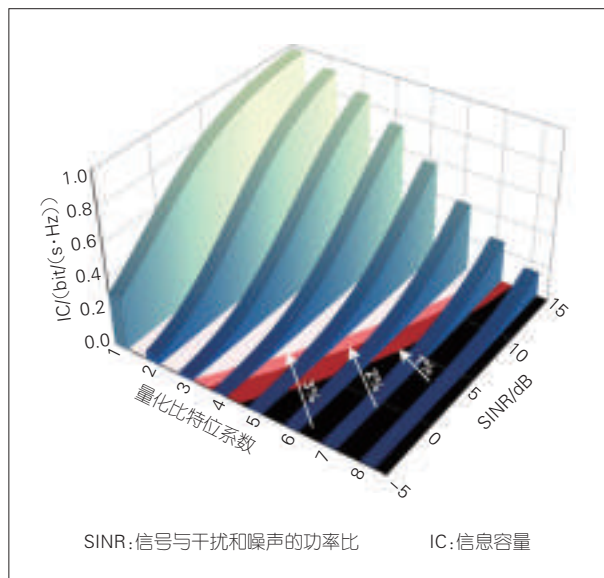


图7 弹性量化配置方案与仿真性能结果

把请求的峰值带宽抑制到只有对照组的60%,极大地提升了前传光链路的传输效率。

此外,上行eCPRI的压缩还可以引入消除瑞利衰落信道带来的影响的技术<sup>[12]</sup>。通过补偿瑞利信道衰落来减少IQ信号的动态范围,可以有效地节省前传量化精度。

## 4 结束语

高速移动前传网络将是未来光接入网增长的重要驱动之一。随着芯片工艺进步与成本下降,通过先进的数字信号处理手段提升单波长传输容量与性能将是未来光接入网的发展趋势,也是业界研究工作的主要发力点。同时针对前传数据的特征使用新型编解码、调制格式也能够显著提升链路性能。通过构建无线前传协同系统,根据前传负载与空口信号质量灵活调整eCPRI参数,前传网络将变得更加智能与高效。多层次的技术革新将会更好地推进5G与B5G接入网络的落地。

## 致谢

本研究得到区域光纤通信网与

新型光通信系统国家重点实验室毕美华博士后、张阔博士、忻海云博士的帮助,谨致谢意!

## 参考文献

- [1] HU W S, HE H, ZHANG K, et al. A Comprehensive Optical Mobile Fronthaul Network Toward High-Fidelity, Flexible and Low-Latency Transport [J]. Photonic Network Communications, 2019, 37(3): 322. DOI: 10.1007/s11107-019-00829-z
- [2] 中国移动通信有限公司研究院. C-RAN白皮书:无线接入网绿色演进V3.0[R]. 中国移动通信有限公司研究院, 2014
- [3] 中国移动通信有限公司研究院. 下一代前传网络接口白皮书V1.0[R]. 中国移动通信有限公司研究院, 2015
- [4] CPRI Group. Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification V7.0[EB/OL]. (2017-8-22)[2019-07-20]. [http://www.cpri.info/downloads/CPRI\\_v\\_7\\_0\\_2015-10-09.pdf](http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf)
- [5] CPRI Group. Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification V1.0[EB/OL]. (2015-10-02) [2019-07-20]. [http://www.cpri.info/downloads/CPRI\\_v\\_1\\_0\\_2015-10-09.pdf](http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_1_0_2015-10-09.pdf)
- [6] RASMUSSEN J C, DRENSKI T. DSP for Short Reach Optical Links[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). New York, USA: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ecoc.2017.8346204
- [7] ZHANG K, ZHUGE Q, XIN H, et al. Intensity Directed Equalizer for the Mitigation of DML Chirp Induced Distortion in Dispersion-Unmanaged C-band PAM Transmission[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28123-28135
- [8] 3GPP. Study on CU-DU lower layer split for NR (Release 15): 3GPP TR 38.816, V15.0.0[S]. 3GPP, 2017
- [9] XIN H, ZHANG K, HE H, et al. Fidelity Enhancement in High-Data-Rate Digital Mobile Fronthaul with Sample bits Interleaving and Unequally-Spaced PAM4[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 5559-5570. DOI: 10.1364/oe.25.005559

Express, 2017, 25(9): 5559-5570. DOI: 10.1364/oe.25.005559

- [10] 中国电信 CTNet2025网络重构开放实验室. 5G时代光传送网技术白皮书[R]. 中国电信 CTNet2025网络重构开放实验室, 2017
- [11] LI L S, BI M H, MIAO X, et al. Quantization-Noise Suppression for Uplink eCPRI Assisted by Wireless-Channel Estimation Feedback [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC) 2018. New York, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ecoc.2018.8535188
- [12] LI L S, BI M H, WANG W, et al. SINR-Oriented Flexible Quantization Bits for Optical-Wireless Deep Converged eCPRI[C]//2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), May 14-17, 2018. New York, USA: IEEE, 2018. DOI: 10.23919/ondm.2018.8396126

## 作者简介



**李隆胜**, 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读博士;研究方向为光与无线融合的前传传输关键技术;发表论文10余篇。



**胡卫生**, 上海交通大学特聘教授;先后担任区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室主任、《Optics Express》和《Journal of Lightwave Technology》等期刊编委、OFC等国际会议TPC委员等;主要从事全光通信网的教学和科研工作;发表学术论文近500篇。

# 新型消费类电子光互连应用

## Optical Interconnect Technology in Consumer Electronics Markets

黄君彬/HUANG Junbin

(深圳市埃尔夫光电科技有限公司, 广东 深圳 518001)  
(Shenzhen AFALIGHT Co., Ltd, Shenzhen 518001, China)



**摘要:** 介绍了光互连在新型消费类电子市场,如高清多媒体接口(HDMI)、通用串行总线(USB)、DisplayPort、专业音视频以及分体式电视领域的新应用。采用板上芯片封装(COB)方案为基础的新型消费类电子市场有源光缆(AOC),以其低成本生产技术、小体积、支持多路光通道集成的特点,自2018年以来迅速得到了市场的认可。进一步介绍了具有代表性的HDMI、USB以及分体式电视AOC的性能特性以及市场应用。认为大量的新型光电产品将会出现在消费类电子市场。

**关键词:** 消费类电子市场;板上芯片封装;AOC;光模块;并行多通道光路集成

**Abstract:** In this paper, optical interconnect applications in new consumer electronics market, such as high definition multimedia interface (HDMI), universal serial bus (USB), DisplayPort, Customized Video & Audio System, TV market are introduced. Since 2018, consumer electronics active optical cable (AOC) products, which is based on chip on board (COB) technology, have acquired consumer market approbation due to low cost, small packaging and parallel optics solutions. The detail specification and application of HDMI, USB and TV AOC have been further discussed. Finally, the roadmap and development prospects of optical interconnect in consumer electronics market have been concluded at the end of this paper. It is believed that a large number of new optoelectronic products will appear in the consumer electronics market.

**Key words:** consumer electronics market; COB; AOC; optical transceiver; parallel optics

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191010.1643.004.html>

网络出版日期: 2019-10-10

收稿日期: 2019-08-20

传统的光模块,如小型可插拔(SFP)、四通道SFP接口(QSFP)、十六通道可插拔光模块(CXP)、吉比特无源光网络(GPON)等数据中心以及电信网用的光模块,由于其光发射次模块(TOSA)/光接收次组件(ROSA)(光学芯片

封装)在量产中的高生产成本、大体积,并无法满足多路光通道传输需求等因素,无法达到消费类电子市场的客户需求标准,因此一直无法在新的领域广泛应用。

板上芯片封装(COB)工艺以其低成本、小封装体积的优势,在传统光模块领域一直被用作有源光缆(AOC)的光学封装解决方案。自2018年以来,在消费类市场,如高

清多媒体接口(HDMI)、通用串行总线(USB)、数字式视频接口(DisplayPort)、专业音视频领域以及分体式电视市场,出现了越来越多的以COB方案为基础的新型AOC解决方案。这是光互连在新型消费类电子领域的新应用。

### 1 COB工艺

COB也称为芯片直接贴装,就

**基金项目:** 国家重点研发计划“宽带通信和新型网络”重点专项“面向数据中心的短距离光互联技术”项目(2018YFB1801702)

是将未经封装的裸芯片(包括光芯片以及电芯片)直接组合并粘贴到印刷电路板(PCB)上,然后进行引线键合,最后对封装进行保护处理的工艺。

COB的技术核心由2部分构成:固晶(Die Bond)和引线键合(Wire Bond),前者是贴片,后者是绑线。COB是在电芯片以及发光二极管(LED)封装中大量采用的一种成熟工艺,之前一直应用于一些基于封装性能要求不高的产品。

传统光通信行业(特指数据中心网以及电信网中应用的光通信行业)在40 G/100 G等多路平行封装中遇到瓶颈,之前的TOSA/ROSA体积过大并且无法满足多路平行封装的体积要求,因此COB技术在2010年左右就已成为光通信领域的热门话题<sup>[1]</sup>。

COB工艺用在光通信时有2点显著不同的特点:(1)其封装精度要求提高了很多。典型的固晶精度要求由原来电芯片以及LED封装中的几百微米发展到在光通信封装中的5  $\mu\text{m}$ 以内;因此,此时的COB封装,也被称为亚微米级(Sub-Micron)精度封装技术。(2)由于引入了光芯片(垂直腔面发射激光器(VCSEL)和光电二极管(PIN)),光路部分必须通过光器件(透镜、反射镜或者其他光学器件)将光信号传递到光纤中;因此对封装芯片的保护不能采用电芯片封装处理方式,同时这里的光器件同样需要做到亚微米级的封装(耦合)精度。

在数据中心和电信网等传统光通信模块市场中,COB工艺被用作

AOC的方案,如SFP、QSFP、迷你串行小型计算机系统接口(MiniSAS)等接口类型的基于电气和电子工程师协会(IEEE)以太网或者InfiniBand协议的AOC。AOC比之前的光模块方案在成本、多通道集成以及光学信号检测成品率上都有明显的优势;其唯一劣势在于长度固定,不能如光模块一样使客户可以自由更换长度。

自2018年以来,在消费类光通信市场出现一种新型的基于COB工艺的光模块方案<sup>[2]</sup>,并且将传统光通信市场AOC生产工艺拆分为2部分:前端模块供应商先提供基于COB工艺的光模块半成品,后端加工厂制作AOC成品。

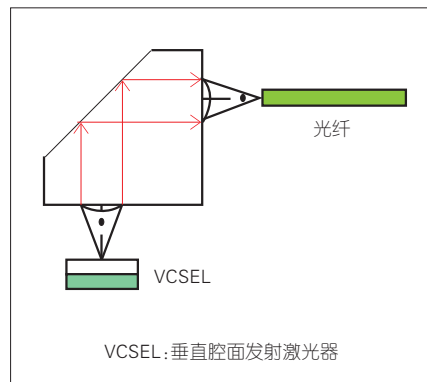
这种新型技术方案的引入,大大推动了光互连应用在消费类电子市场的发展。三星率先在分体式电视市场采用了这种新型COB工艺的AOC方案,在其出厂的新型分体式大尺寸电视中,主机盒与电视屏幕之间的高速视频信号、低速控制信号以及电源信号全部使用其定制的混合缆AOC。2018年是HDMI AOC市场迅速崛起的一年,许多新型的AOC产品开始涌入消费类电子市场,光互连应用开始在这一全新的领域实现应用和产品量产。

### 1.1 低成本

消费类电子市场对成本非常敏感,尽管在2018年以前也有部分传统光通信厂商尝试过进入该领域,然而大多因为生产工艺不成熟造成价格高昂,无法真正带动消费类电子市场的光模块产品应用。

一种低成本生产技术的COB工艺于2018年开始出现在消费类电子光互连市场,其主要技术特点体现在2点:适合量产的光学器件以及批量高效率的光学耦合方式。

光学器件在发射端将VCSEL中发出的光引导至多模光纤中,同时在接收端将多模光纤中的光引导至PIN中,具体见图1。由于VCSEL的发光面以及PIN的光电探测面向上垂直于印刷电路PCB板。而多模光纤的耦合方向是平行于PCB板,因此在COB工艺中,光器件需要将光转动90°。一种高效的利于量产的光学器件的方法是用Ultem塑料材料注塑一体成型,分别设计3个光学平面。以发射端为例,第一聚光面将VCSEL发出的成高斯状能量分布的光聚合成类准直光;第二光平面为一个45°反射面,类准直的光束在45°入射时形成全反射(Ultem材料的折射率约为1.65),此时经过此第二光平面后形成类准直的平行于PCB板的光束;第三光平面为另一聚光面,类准直的平行光束经聚光面汇聚,形成入射的聚焦光束进入多模光纤的纤芯。在接收端的光路与发射端光路类似,只



▲图1 板上芯片封装光路示意图

不过光的方向相反。新型光学器件适合量产,一方面体现在其适合注塑成型的材料大大降低了单个光学器件的成本,另一方面体现在光学参数设计的优化上。光学参数,例如2个聚光面的非球面曲率参数的优化,可以使得光器件在其本身的制作公差以及光学耦合误差的容忍度上大大提高,从而在成本设计以及最终光灵敏度需求中间取得一个平衡点。要做到这点,光学设计师需要对光路原理有着深刻的理解并同时对生产制作有着丰富的经验。

光学耦合方式一般可以分为主动式和被动式。主动式耦合,即在耦合过程中通过信息反馈(Feedback)的方式持续地调节耦合位置,直到达到最佳值为止,其特点是必须在耦合过程中让光芯片进入工作状态,所以称之为主动;被动式耦合,即在耦合过程中光芯片是不工作、不通电的,被动式耦合的方法有很多种,典型的一种是通过精密固晶机,直接通过拍照对准的方式将光器件精密地固定到指定地为止,误差范围一般在 $5\mu\text{m}$ 左右。

市场上主流的AOC光学耦合方式经历了从被动式到主动式的发展历程。最初的AOC市场,厂商用大型的精密固晶机被动式耦合的方法,可以将精度控制在 $5\mu\text{m}$ 以下,满足性能要求。然而综合计算生产成本,由于精密固晶机的设备投入大,单个设备耦合速度并不能真正满足量产的需求。批量提高耦合方式的效率最终需要用到主动式耦合方式。主动式耦合的设备,能够针对COB工艺的特点进行定制化的

设计,如根据COB工艺中PCB板小的特点,设计了定制化的治具,可以在20个、40个的连板上同时操作多个耦合工位。另外,主动式耦合的设备投入小,一般不到精密固晶机的价格的十分之一,同时单个设备产能大(最好的能达到被动式耦合设备的5倍以上),因此大大降低了生产成本。

## 1.2 小体积

相对于数据中心、电信网市场而言,消费类电子市场中的产品种类数和功能极大地增加了。目前,传统数据中心、电信网市场对于光模块的接口大多集中于少数的几个类型标准,如SFP、QSFP、MiniSAS、CXP等。而消费类电子的接口数量远远超过了数据中心中的接口数,其中标准接口有视频类的HDMI Type A、HDMI Type D、数字视频接口(DVI)、DisplayPort、Mini DP、USB Type C、Mipi等,数据类的接口有USB Standard A、USB Micro B、USB Standard B、Mini USB、Thunderbolt、USB Type C等。另外,更多的接口是客户定制接口,如Facebook、微软的虚拟现实(VR)头盔上用的一款Oculink接口、三星分体式电视定制化的接口等。在这些新型的消费类电子的接口类型中,小体积的COB工艺光模块有利于光互连在不同产品、不同功能中的应用中推广。

由于COB工艺是将未经封装的裸芯片(包括光芯片以及电芯片)直接组合粘贴到PCB电路板上,相比于传统光通信光模块所使用的封

装好的TOSA、ROSA,裸芯片加上设计的光学器件所需要的体积要小很多。以单通道光芯片尺寸为例,单颗VCSEL或PIN的长宽均为 $0.25\text{mm}$ ,高一般为 $0.15\text{mm}$ ;而定制化的光器件设计,最小尺寸可以在 $1\text{mm}$ 以下。考虑到耦合治具以及连接光纤的结构件设计,长宽均可以做到 $5\text{mm}$ 以内。由此可见,基于COB工艺的光模块体积可以适配绝大多数消费类电子市场对于结构的需求。

## 1.3 支持并行多通道光路集成技术

COB工艺不仅可以支持小体积、小尺寸的光器件以及光模块的设计,还能很好地支持并行多通道光路集成技术。由于直接处理裸芯片,在光芯片晶元切割时,可以定制4路、8路或12路并行阵列,光学器件也可以定制设计成4路、8路或者12路光通道与之对应。4路、8路以及12路为常见的阵列数组合,在传统数据中心网络中对应的接口类型为:QSFP、MiniSAS、CXP等。另外,多模光纤阵列一般也以12路为常见通道数,光纤插件如多光纤推进(MPO)光纤连接器等也均以12路通道数为标准设计。近年来,还出现了24路的MPO,一般应用于一些特殊场合或者光波导系统设计。并行多通道光路集成技术在COB工艺中得到很好的实现,这一点是传统TOSA、ROSA无法做到的。

消费类电子同样对并行光通道处理有着非常强烈的需求,例如HDMI、DisplayPort、DVI都是4个单向通道,USB Type C是双向双通道,

而VR、分体式电视等特殊的应用一般都需要数据传输和视频传输并行,一般要求6通道或以上。

并行多通道光路在光模块端极大简化了模组电处理上的设计,并解决了高速电信号在传输中无法逾越的问题,如电磁干扰(EMI)、传输长度、线缆外径过粗、体积过大等,为新型的应用提供了简单、可行、可靠且低成本的光互连解决方案。

## 2 新型消费类电子光互连应用

### 2.1 HDMI AOC

2018年是HDMI AOC市场迅速崛起的一年。图2为HDMI AOC的原理示意图,其中有4对高速信号差分对,分别对应视频信号中红、绿、蓝三色(RGB)以及一组时钟信号对。光互连将这4对高速信号对在线缆两端进行光电转换,换成光信号传输,从而实现以前铜线技术无法满足的超长距离传输。除了这4对高速信号差分外,其他信号依旧按原来铜线传输。(注:也有部分技术方案将所有信号转成光纤,然

而目前由于其兼容性以及模组的成本价格原因,还没有形成大规模量产。这里介绍的是已经量产的混合缆HDMI AOC。)

HDMI AOC分HDMI 1.4、2.0以及2.1版本,对应的传输速率分别为3.4 Gbit/s、6 Gbit/s以及12 Gbit/s每通道,分别能传输4 K 30 Hz、4 K 60 Hz以及8 K 30 Hz的高清视频分辨率。其接口类型又分为HDMI Type A和Type D 2种接口。

HDMI AOC主要应用场景有大型会议室、电教室、家庭影院、户外拍摄、视频监控控制、工程布线等有需要用到长距离、高清视频传输的地方。

### 2.2 USB AOC

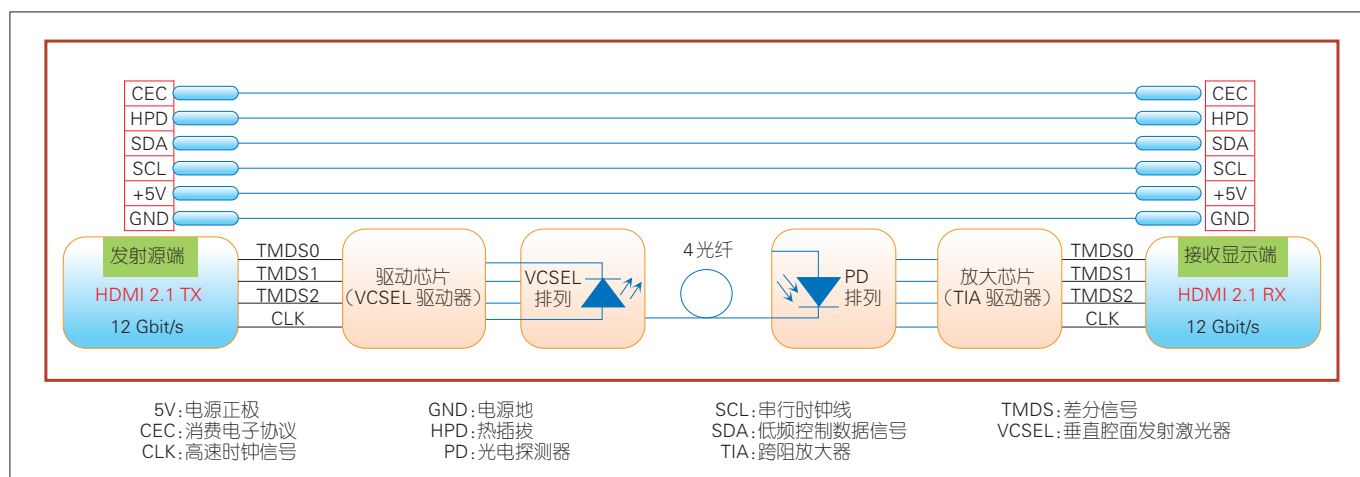
USB是电脑端最常见的接口,USB 3.0 AOC的原理示意如图3所示。USB 3.0 AOC有一对双向的高速信号差分对,以传输USB 3.0高速数据信号。光互连将这对双向高速信号在线缆两端进行光电转换,换成光信号传输,从而实现远距离的数据传输。

USB的接口类型比较多,如Standard A、Micro B、Mini、Type C等,按协议和速率又分为USB 2.0、USB 3.0、USB 3.1等。USB AOC的典型应用场景有工业摄像头、PC机数据传输,以及各种大型会议数据布线等。

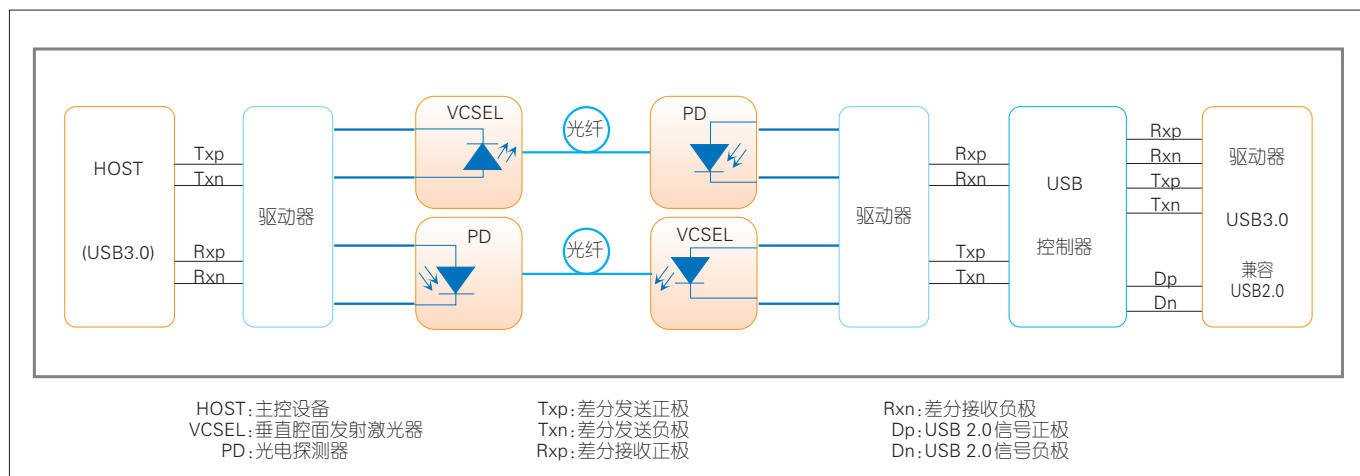
### 2.3 分体式电视 AOC

2018年,三星首创了在其分体式电视采用光互连方案传输,并在当年销售了上百万台该分体式电视,开启了光互连在消费类电子市场尤其是电视市场的量产应用先河。2019年,创维的分体式Q80<sup>[3]</sup>,应用了中国厂商的光模组方案,首次在中国发布并销售。

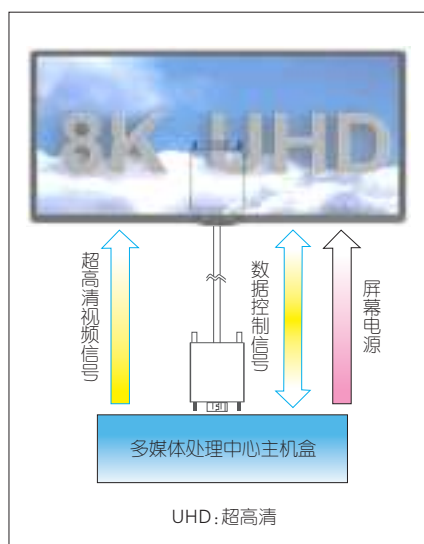
分体式电视的功能示意如图4。分体式电视的主要特点是显示功能和多媒体控制功能的分离,让显示屏仅做显示的作用,因此显示部分的设计可以做得超薄、超高清以及大尺寸。控制部分因为与显示部分分离,因此具有可升级、更换的特点,并且多媒体对外接口齐全,还能做成物联网加人工智能(AIoT)的



▲图2 HDMI 2.1有源光缆原理示意图



▲图3 USB3.0有源光缆原理示意图



▲图4 分体式电视有源光缆原理示意图

生态中心控制接入点。

关于分体式电视的设计和概念,2018年以来已经成为全球电视技术的讨论热点,从智能家居以及显示屏本质特性来看,分体式电视将会是未来物联网、人工智能以及家庭娱乐的一个综合处理中心和解决方案。在这样一个具体的产品形态中,光互连是其中一个必不可少的设计部分。由于显示屏的超薄特性,高清视频信号的传输需要一个

既高速又纤细的数据线,因此光纤是唯一的选择。整个屏幕仅靠一条传输线驱动,因此这是一条混合型AOC,里面还包括给屏幕的供电电源线以及双向的低速数据控制信号等。超高清视频信号经过光电转换,从主机盒传送到屏幕。双向的低频数据控制信号接通屏幕和主机盒的通信。高压以及大电流的电源信号从主机盒通过这条混合AOC供给电视。

### 3 光互连技术的发展路线与消费类电子市场光互连发展的契合

光互连的技术发展路线<sup>[4]</sup>具体如图5所示,经历了从电信网“Telecom”的几千米到几十千米再到几百千米的传输,到数据网“Datacom”的几百米到100米以内的传输,再到计算网“Computer-com”小于1米甚至几毫米之间的传输。电信网是设备与设备之间数据传输,数据网是板边(Card Edge)服务器与服务器或交换机之间的传

输,而计算网则是板内、芯片与芯片之间甚至是芯片与芯片内部之间的光传输。

电信网的客户是运营商,如电信、移动、联通;数据网的客户是各大数据中心,如腾讯云、阿里云、百度云等;电信网和数据网即本文中提到的传统光通信模块的应用场景,其较常见的接口类型如SFP、QSFP、CXP、MiniSAS等,遵循的协议有以太网、Infiniband等。

到了计算网,将出现大量短距离的光互连,如板载光引擎(On-board Optics)技术,该技术是近几年光互连的一个研究热点。以太网协会IEEE<sup>[5]</sup>在2016年首次将“光模块小型化”“光集成化”等构想写入以太网技术发展路线图中,并提出“光电转换嵌入进系统”的概念和市场发展方向。未来的硅光通信,则有望实现更短距离间的光护栏,如芯片与芯片间,甚至芯片内部通信。硅光通信,是指用硅材料做的发射器(激光)、接收器(光电探测器)、调制解调器(如果是间接调制



▲图5 光互连技术发展路线图

的话)以及波导(硅波导一体成型)。

从技术的角度看,消费类电子市场的光互连应用属于计算网光互连应用的一种;不同于传统电信网和数据网市场,它对光互连的需求并不仅仅满足于板边互联(如分体式电视、医疗等应用),而是已开始将光模块做进板内;消费类市场对光互连低成本、小体积以及并行多路光通道的技术要求,促使光互连朝着计算网光模块的性能标准要求发展。

从市场的角度看,随着4 K/8 K高清视频概念的兴起,2019年全球HDMI接口产品的总出货量预期将近10亿台<sup>[6]</sup>;2019年全球USB各种型号下,仅仅Type-C型号的设备出货量预测超20亿台<sup>[7]</sup>;2018年全球电视的销售量大约2.25亿台<sup>[8]</sup>,以上仅是消费类电子市场的代表领域。在“光进铜退”的政策下,人们对数据传输量需求也越来越大、越来越快,可以预见消费类电子市场的光互连应用的增长是一个必然的

市场趋势。在未来的光通信领域中,消费类电子市场将占据越来越重要的地位,由于其所涵盖的领域和应用足够多,其市场份额必然会远超传统光通信市场。

因此,无论从技术上还是市场发展角度看,大量的新型光电产品会出现在消费类电子市场,这是光互连发展的必然趋势。

#### 4 结束语

从数据传输的角度看,从古至今人类广泛应用的传输介质只有3种:铜、光和无线,并且它们都是以电磁波的形式来传输信息。2019年已经开始进入5G网络、4 K/8 K超高清视频以及数据量剧增的时代,传输介质的需求也会日益增长。可以预见,光互连市场将会很快迎来巨大的增长,而且由于新技术新方案的引入,光互连将在越来越多的市场和领域中得到更广泛的应用。提到光通信,人们将不仅只想到在其数据中心、运营商里应用

到的光模块,也会开始想到家里的电视、手机、汽车、投影仪、电教室、会议室等日常接触的消费类电子产品中都用上了光通信。相信这样的未来很快就会到来!

#### 参考文献

- [1] 光通信领域里 COB 模式将何去何从? [EB/OL]. (2015-06-09)[2019-08-10]. <http://www.eepw.com.cn/article/275404.htm>
- [2] 埃尔夫光电研发实力[EB/OL].(2016-08-01)[2019-08-10]. <http://www.afalight.com/yanfashili/>
- [3] 创维发布三屏互联网电视 Q80 和全新生态品牌 Swaiot [EB/OL].(2019-03-27)[2019-08-10]. <https://tech.sina.com.cn/e/r/2019-03-27/doc-ihxyzm0958398.shtml>
- [4] TAUBENBLATT M. Optical Interconnects for Computer-Com[C]//Conference Proceedings - International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2012. DOI: 10.1109/ICIPRM.2012.6403303
- [5] The 2019 Ethernet Roadmap. [EB/OL].(2019-03-27)[2019-08-10]. <https://ethernetalliance.org/technology/2019-roadmap/>
- [6] 2019 年带 HDMI 接口产品的年度出货量预期将近 10 亿台[EB/OL].(2019-01-08)[2019-08-10]. <http://www.minimouse.com.cn/plan/2019/0108/48949.html>
- [7] 全球 USBType-C 产业链分析与设备出货量预测: 2019 年出货量超 20 亿[EB/OL].(2017-09-07)[2019-08-10]. <http://market.chinabaogao.com/it/0a2946122017.html>
- [8] 2018 年全球 TV 出货止跌回涨,2019 年还会继续上扬吗? [EB/OL].(2019-02-02)[2019-08-10]. [http://www.sohu.com/a/292990057\\_339916](http://www.sohu.com/a/292990057_339916)

#### 作者简介



黄君彬, 深圳市埃尔夫光电科技有限公司董事长兼总经理, 深圳市海外高层次人才, 高级工程师; 主持国家重点研发项目 1 项, 市级科研项目 3 项, 项目资金超过 1 400 万; 拥有通信相关专利 50 余项, 其中发明专利 26 项。

# 面向多场景应用的新型 光纤同轴混合接入技术

## The Hybrid Fiber Coaxial Access Technology for Multi-Application Scenarios



赵辉/ZHAO Hui<sup>1,3</sup>, 刘跃/LIU Yue<sup>1,3</sup>, 张诚/ZHANG Cheng<sup>2</sup>

(1. 北京瀚诺半导体科技有限公司, 北京 100080;

2. 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871;

3. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

(1. Beijing Hannuo Semiconductor Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems & Networks, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

**摘要:** 同轴电缆网络是中国信息基础设施的重要组成部分, 具备传输容量大、入户率高、室内接口广泛等优势。基于高性能同轴电缆网络(HINOC)的光纤同轴混合接入技术可以充分发挥同轴电缆优势, 提供高速、可靠、可管理运维的入户管道, 并可以在室内进行渗透组建家庭互联网络, 支撑多种场景的业务部署和应用。

**关键词:** 无源光网络; HINOC; 服务质量; 信道均衡; 网络管理

**Abstract:** Due to the advantages of large channel capacity and high household penetration rate, coaxial cable network is one of the important components of China's information infrastructure. The hybrid fiber coaxial access technology based on High Performance Network Over Coax (HINOC) can fully utilize the advantages of coaxial cable, and change it to a high-speed, reliable and manageable communication pipeline. This technology can be used to establish an excellent performance access network or home Internet, which supports multi-application scenarios.

**Key words:** passive optical network; HINOC; quality of service (QoS); channel equalization; network management

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190927.1354.004.html>

网络出版日期: 2019-09-27

收稿日期: 2019-07-22

当前中国新一代信息技术支撑数字经济进入快速发展阶段, 信息基础设施建设成为拉动经济增长的新支点。伴随着“宽带中国”“超高清视频产业发展行动计划”等系列国家战略的实施落地, 加快打造室内高速通信通道和网络成为信息领域发展关键。室内高速通信通道和网络不仅是新业态、新技术的重要组成部分, 更是抢占新兴

产业发展制高点、推动传统产业升级赋能的重要引擎。

有效、优质的入户管道是运营商提供宽带网络服务的“生命线”。中国骨干网已基本实现“全光化”, 而用户侧最后一段信息点连接呈现“因地制宜”式发展。从目前市场情况来看, 实现有线宽带接入的介质包括双绞线、电力线、光纤和同轴电缆。从覆盖规模上来看, 光纤、同轴是目前市场主流的2种接入介质, 单从介质本身而言, 两者并无本质

优劣差异。由于用户环境的复杂性, 尤其在一些老旧小区内, 目前相当一部分光纤入户只到楼头, 光纤入户较为困难; 同轴电缆拥有千亿存量资源, 几乎实现了100%入户, 同时还渗透到室内各个主要的活动场所。

作为泛在的信息接入口, 同轴电缆业务承载能力强, 容易部署升级, 符合“一线多能”的要求; 然而由于同轴传输技术的限制, 同轴电缆并未得到充分利用, 未发挥其全部

基金项目: 国家重点研发计划  
(2018YFB1801403, 2018YFB1801402)

价值。本文中,我们将对光纤同轴混合接入技术的发展现状进行分析,提出了基于高性能同轴电缆网络(HINOC)的新型光纤同轴混合接入技术。该技术可用于构建宽带接入或智慧家庭互联网络,支撑多种场景的业务部署和应用。

## 1 光纤同轴混合接入技术

同轴电缆是一种泛在的入户介质。除了用于有线电视信号的单向广播传输之外,中国多数同轴电缆网络已完成双向化改造,可用于光纤同轴混合接入,承载双向互联网协议地址(IP)业务。

### 1.1 传统的光纤同轴混合接入技术

目前,中国普遍使用的光纤同轴混合接入技术可以分为2类:一类是基于混合光纤同轴电缆(HFC)网络的有线电视数据服务接口规范(DOCSIS)技术,一类是无源光网络(PON)+同轴电缆以太网传输(EoC)的两级组网技术,具体如图1所示。

DOCSIS技术在美国有线运营商网络中得到了广泛部署。DOCSIS网络的局端设备电缆调制解调器终端系统(CMTS)和终端设备电缆调制解调器(CM)通过HFC网络相连。其中,光纤分配网络与同轴分配网络之间需要负责光电信号转化的光节点设备,每个光节点下的同轴网络中可以支持一级或多级有源放大器。采用HFC的网络拓扑结构,可以增强单个CMTS设备的地理覆盖能力和终端数目支持能力,但这种光纤同轴一体式的网络结构容易导致局端设备昂贵、上行带宽不足、上行噪声汇聚等问题。

PON+EoC技术在中国多数省市得到广泛部署。光纤和同轴2种不同介质的分配网络可独立选择不同的网络传输技术:光纤分配网络可选用以太网无源光网络(EPON)、吉比特无源光网络(GPON)、10 Gbit/s以太网无源光网络(10 G EPON)、10 Gbit/s无源光网络(XG-PON)等PON网络技术,光网络终端(ONU)光节点更靠近用户侧,通常位于楼头或者楼道,即光纤到楼(FTTB);同轴分配网络可选用家庭插座电力线联盟电力线通信技术(Homeplug AV)、同轴电缆多媒体联盟通信技术(MoCA)等多种EoC网络技术,起到最后100 m的入户功能,且分配网络中通常不含有源放大器,信道质量更佳。采用光纤同轴级联的接入方式,具有组网灵活性强和建设成本低的优势。

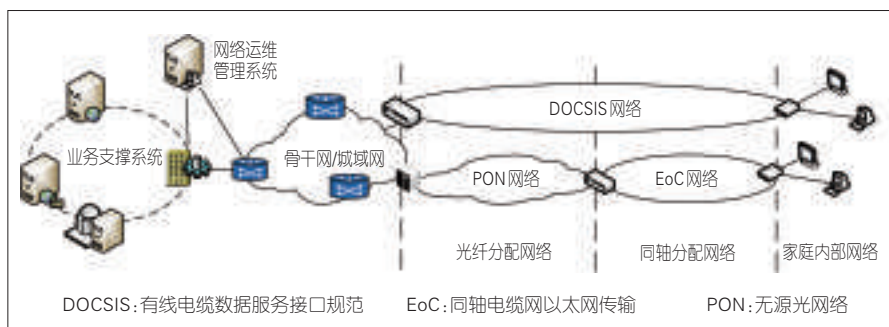
然而,目前EoC技术繁杂,且存在服务质量(QoS)保证能力差、网络总体带宽不足以及网络管理不完备的缺点。

### 1.2 基于HINOC的新型光纤同轴混合接入技术

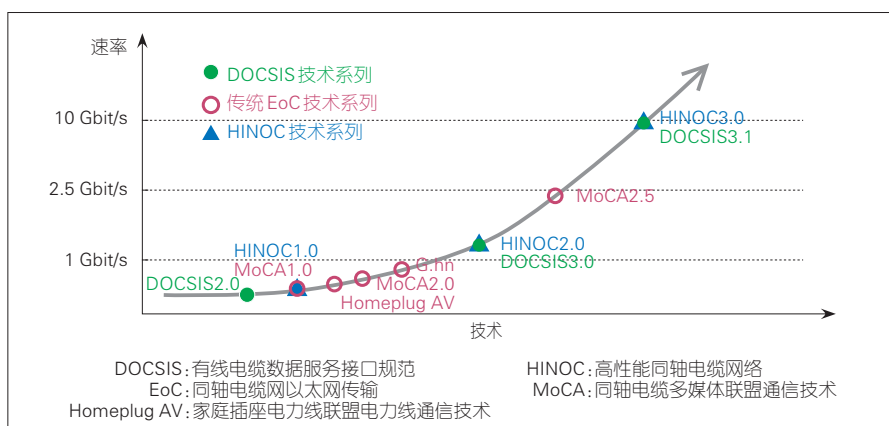
如图2所示,当前同轴传输技术可以分为DOCSIS、传统EoC以及HINOC 3类技术。

DOCSIS从百兆的1.0技术版本已经逐渐发展到万兆的3.1技术版本,DOCSIS 3.0的简化版本C-DOCSIS可用于PON+EoC的网络结构,但仍然具备上文所述问题:传统EoC技术种类繁多,均源自于欧美地区的家庭互联技术,多数技术的传输带宽在数百兆比特每秒,且宽带业务的QoS保证能力欠缺。

HINOC是针对中国有线同轴



▲图1 光纤同轴混合接入技术



▲图2 当前同轴传输技术

网络特性研发的唯一具有完备自主知识产权的新型同轴宽带通信解决方案, HINOC 2.0 技术传输速率可达 1 Gbit/s, 支持信道绑定, 具备灵活的管理和控制机制, 性能指标远超同类同轴通信技术。目前, 中国已有 3 家芯片厂商、10 余家设备商、10 余家省网运营商开展了 HINOC 小规模试点应用。本文中, 我们提出的基于 HINOC 的新型光纤同轴混合接入结构如图 3 所示: 光纤分配网络采 10 G 无源光网络技术, 同轴分配网采用千兆 HINOC 技术。基于 HINOC 大带宽、低时延以及丰富的管理控制接口, 可实现最后

100 m 的宽带入户。

## 2 HINOC 技术特点

HINOC 2.0 技术在 2016 年形成中国广播电视行业标准 GY/T297-2016, 并被国际电信联盟电信标准分局 (ITU-T) 发布为 J.196 标准族, 其主要技术指标如表 1<sup>[1]</sup>所示。

HINOC 技术可为业务传输提供全方位 QoS 保证, 并针对网络管理拥有完备解决方案, 相较于之前的宽带接入传输技术, 其技术创新性主要体现在如下 3 个方面:

(1) 吉比特宽带传输。吉比特宽带的传输可以选择同轴电缆信噪

比较高的高频段, 通过介质接入控制 (MAC) 层和物理层的高效通信机制设计, 在 128 MHz 单信道内最高可提供 1.14 Gbit/s 的传输速率, 频谱效率达到 8.87 bit/(s·Hz)。通过信道绑定的方式, 局端可以实现更高速率的传输。

(2) 毫秒级超低延迟。毫秒级超低延迟可以针对用户需求, 优化接入控制, 通过独有的调度机制实现了 2.5 ms 以内的平均延迟和 1 ms 以内的平均抖动, 以满足未来 4 K 超高清视频/虚拟现实/增强现实等新型业务对于时延的严格要求。

(3) 电信级运维管控。电信级运维管控支持丰富的管理控制指令, 可对任意特征的数据流进行精细控制; 可根据用户实时的带宽需求实现动态分配, 并对网络的实时环境进行监测控制, 实现智能告警、故障溯源、网络优化等。

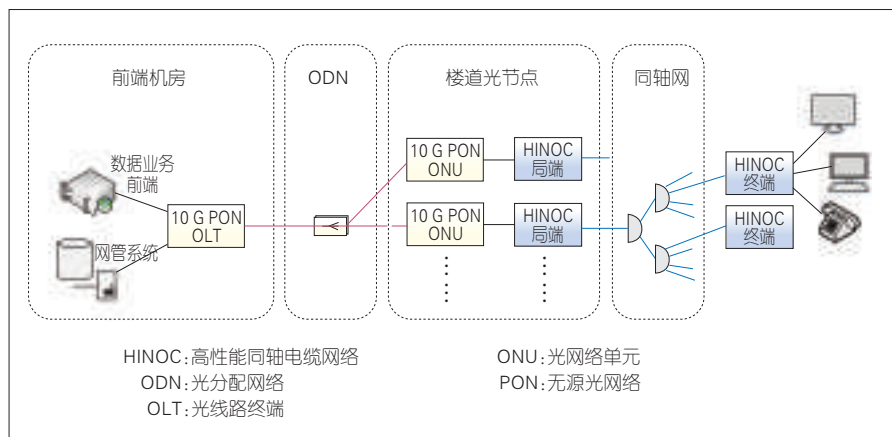
### 2.1 物理层技术特点

根据同轴信道的特点, HINOC 物理层设计采用了正交频分复用 (OFDM) 与自适应调制编码技术, 并配合分布式的信道均衡技术, 以最低的资源代价, 有效克服单频干扰、冲击噪声、多径效应等信道噪声, 实现稳定和高效的物理层传输, 从而达到频谱效率和系统稳定性的最优。

#### 2.1.1 OFDM 与自适应调制编码技术

因为 OFDM 的技术优势以及硬件计算资源的发展, OFDM 调制技术近年被广泛应用于最新的通信系统之中, 其技术优势体现在如下的几个方面<sup>[2]</sup>:

(1) 作为多载波调制技术,



▲图3 基于HINOC的新型光纤同轴混合接入结构

▼表1 HINOC 2.0的主要技术指标

技术指标	HINOC 2.0 技术参数
MAC 层传输速率	最高支持 1.14 Gbit/s
单信道模拟带宽	128 MHz
调制技术	OFDM
多址方式	TDMA/OFDMA
调制格式	DQPSK、QPSK-4 096 QAM
纠错编码	BCH、LDPC

BCH: Bose-Chaudhuri-Hocquenghem 编码  
DQPSK: 四相相对相移键控  
HINOC: 高性能同轴电缆网络  
LDPC: 低密度校验码

MAC: 介质接入控制  
OFDM: 正交频分复用  
OFDMA: 正交频分多址  
QPSK: 正交相移键控

TDMA: 时分多址

OFDM 中各个子载波之间相互正交,所以允许子载波频谱重叠,相对于传统的多载波技术频谱效率大大提高。

(2)OFDM 信号的调制和解调可以通过快速傅里叶反变换和快速傅里叶变换来实现,实现起来简单。

(3)引入循环前缀,将 OFDM 信号解调时候的线性卷积变成圆周卷积,根据傅里叶变换的性质,信道的多径效应的影响只需要简单的一阶均衡即可去掉,在对抗信道的多径方面有先天的优势,同时在进行频域信道均衡方面也非常方便。

(4)OFDM 技术中数据信息都是通过子载波进行承载,所以可以方便地与其他接入方式相结合,构成 OFDMA 系统,使多个用户同时使用一个 OFDM 符号中的不同子载波组进行数据传输,使用方式灵活。

HINOC 采用的 OFDM 技术除了以上提到的技术优势之外,还可将 OFDM 技术和自适应调制编码技术相结合,最大程度地发挥 OFDM 技术的性能优势。对于模拟带宽较大的通信系统中,往往存在频率选择性衰落或者窄带干扰,导致不同频点的信道信噪比不同。对于 OFDM 系统,每个子载波所在的子信道的带宽往往小于信道的相干带宽,在子信道内部可以认为通道响应和噪声水平不变,所以各个子信道可以根据其信噪比情况自适应地选择调制格式,同时也可以根据整体噪声水平自适应选择整个系统的纠错编码格式,以达到系统的最大传输性能。HINOC 技术综合系统性能和资源,采用将子载波进行分组然后进行自适应调制的方式,同时采用不同纠错能力的 2 种码长的 BCH 信道纠错编码,根据信道状况

进行选择使用,以达到最佳的系统性能和资源的平衡。

### 2.1.2 分布式信道均衡技术

HINOC 的帧类型主要分为探测帧和数据帧,如图 4 所示。其中,探测帧周期性发送,由固定的同步头及 2 个 OFDM 符号组成,用于维持系统的收发同步和信令交互。探测帧采用四相相对相移键控(DQPSK)调制格式,既便于数据的可靠解调,又便于进行盲信道估计,提取出每个子载波的信道的幅度和相位信息,用于信道均衡。

针对同轴信道随时间缓变的特点以及用户长期在线的特点,HINOC 设计了分布式信道均衡机制<sup>[3]</sup>。在 HINOC 系统中,该机制采用多个探测帧进行分布式联合信道估计,对于每个探测帧估计出的频域幅度和相位信息,进行加权平均,以此提高信道均衡的精度,同时也降低了用于信道估计的数据帧中导频的开销。在进行数据帧解调时,信道均衡的幅度信息则直接采用加权平均的幅度,但因 OFDM 符号采样点起始偏差以及载波频率起始偏差,相位信息需要使用数据帧中少量的导频进行偏差纠正。在分布式信道均衡技术的支撑下,HINOC 技

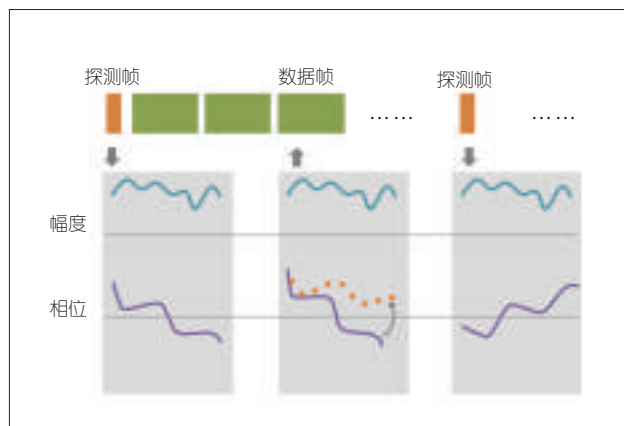
术达到系统解调性能以及协议效率的同时优化。

### 2.2 MAC 层技术特点

HINOC 提供精细的 QoS 保证机制,可通过数据包的任意特征,如 MAC 地址、虚拟局域网(VLAN)ID、服务类别(COS)、差分服务代码点(DSCP)、IP 地址、IP 上层协议类型、传输控制协议(TCP)/用户数据报协议(UDP)端口号等,进行不同的可定制的 QoS 保证。QoS 保证的技术原理如图 5 所示,包括:流识别、流量控制、优先级设定、重标记以及队列调度等。

HINOC 实现了基于服务等级协议(SLA)的动态带宽分配(DBA)功能。基于业务优先级、用户配置的 SLA 模板以及终端上报的实时带宽需求等多种维度的信息,HINOC 局端可对系统的带宽资源进行统一调度。DBA 功能以单个 OFDM 符号时长(17  $\mu$ s)为基本时隙,在 2.5 ms 的调度周期内采用高效的时分多址(TDMA)/OFDMA 多址接入方式对数据包进行调度,保证毫秒级的超低延迟与毫秒级的微小抖动。DBA 最小分配颗粒度为 256 kbit/s,跟踪精度在 5% 以内,跟踪速度大约为 10 ms。

图 4  
高性能同轴电缆网络系统  
中分布式信道均衡机制



此外, HINOC 支持组播功能, 包括 IPv4 Internet 组管理协议 (IGMP) Snooping 以及 IPv6 组播侦听发现协议 (MLD) Snooping 功能。组播业务可以在 HINOC 网络内以组播方式优先转发。

## 2.3 网络管理

HINOC 网络管理实现对 HINOC 网络、设备或功能单元的在线监测控制与管理, 完成对网络及设备的配置管理、故障管理、性能管理和安全管理等网络管理功能。位于远端的网络管理系统采用简单网络管理协议 (SNMP) 管理 HINOC 网络及设备, HINOC 局端设备 (HB) 内置 SNMP 代理, 将 SNMP 的管理消息转化为 HINOC 运维/管理/维护 (OAM) 消息, 实现对网络以及终端设备 (HM) 的管理。

HINOC 网络管理规范制定了丰富的 OAM 管理接口, 主要包括:

网络信息采集, 如同轴电缆信道的幅频/相频/信噪比信息、网络与用户的实时流量状态、丢包统计、缓存与队列状态等信息; 射频参数配置接口, 如工作频点、发射功率、信道绑定模式等; QoS 配置接口, 如流分类配置、DBA 配置、VLAN 配置、组播配置; 针对各种事件的主动上报消息, 如设备重启事件、上下线事件、环路事件等其他异常事件。

## 3 HINOC 技术演进

随着带宽需求的增长, 光纤同轴混合接入技术也需要持续升级, 以适应更低的系统成本、更大的模拟带宽、更高的频谱效率。目前, HINOC 产业链多家单位正在对 HINOC 3.0 版本进行联合研究与设计。该版本以不低于 10 Gbit/s 的传输速率和不大于 1 ms 的平均传输延时为目标, 支持不小于 1 GHz 的模拟带宽, 并采用全频带采样技术

和全双工通信技术等通信领域的前沿技术。

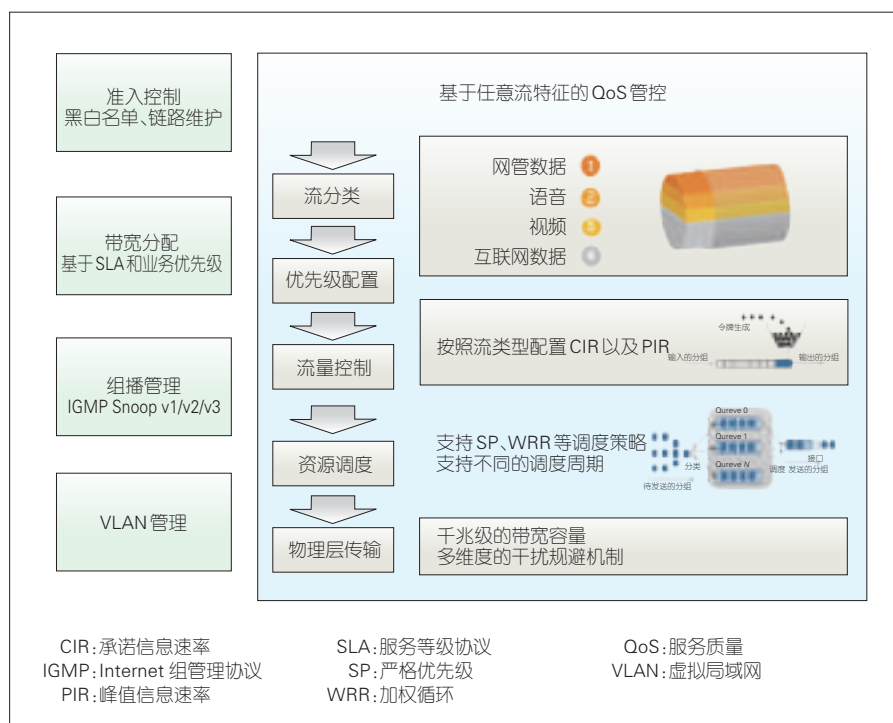
### 3.1 全频带采样技术

在传统的模拟解调器结构中, 单个系统不能实现不同路信号的有效扫描。如果需要对多路信号进行接收, 则需要多套独立的模拟射频调制解调器以及模数/数模转换器, 还有相应的配套电路, 比如模拟滤波器、电源等。这样一来, 整个系统的尺寸、功耗和成本都将大大增加, 同时性能也很难满足需求。

全频带采样将整个有效带宽内的信号完整采样转变为数字信号, 通过高速度和高精度的转换, 可以将系统中的模拟解调器全部替换<sup>[4]</sup>。由于整个有效频带内的信息都进行了有效的采样, 则可以通过复杂的数字信号处理技术, 如数字变频、滤波、采样率变化, 将不同频段的信息进行提取和后续数字信号解调, 具有很大的灵活性, 便于未来的频段规划和实际系统部署。

### 3.2 全双工通信技术

传统的通信系统, 通常采用时分双工或者频分双工的方式进行通信, 而全双工则是指一个通信设备同时、同频进行信号的发送和接收, 理想情况下系统的频谱效率将会翻倍。全双工中主要面临的问题是信号的自干扰<sup>[5]</sup>, 即由于信道衰减, 发送信号功率在设备端往往远远大于接收信号功率, 而收发隔离器或者环路器无法进行收发的理想隔离。这导致设备自身的发送信号对接收信号造成很大的干扰, 接收信噪比较低, 甚至无法进行正确地接收。对于同轴系统来说, 自干扰消除主要在信号的模拟传播域和数字域进



▲图 5 高性能同轴电缆网络的服务质量功能机制

行,通过增加模拟域收发信号的隔离以及在数字域采用自干扰消除算法,降低自干扰的影响,从而提高接收端信噪比和总体的频谱效率。

## 4 典型应用场景

HINOC 技术以 IP 协议栈为业务体制收敛点,在用户侧建立起灵活开放的业务环境,实现“网络与网络、网络与业务”双解耦,提供高速可靠的宽带接入能力,将在 4 K/8 K 超高清视频传输、第 5 代移动通信(5G)技术室内渗透和深度覆盖、智慧家庭网络等领域得到广泛应用,如图 6 所示。

### 4.1 4 K/8 K 超高清视频传输

目前,国家正在大力推进 4 K/8 K 超高清视频业务的开通,各电视台也在积极部署 4 K 业务。预计到 2020 年,4 K 超高清视频用户数达 1 亿;到 2022 年,8 K 前端核心设

备也将形成产业化能力,在文教娱乐、安防监测控制、医疗健康等领域实现超高清视频的规模化应用<sup>[6]</sup>。

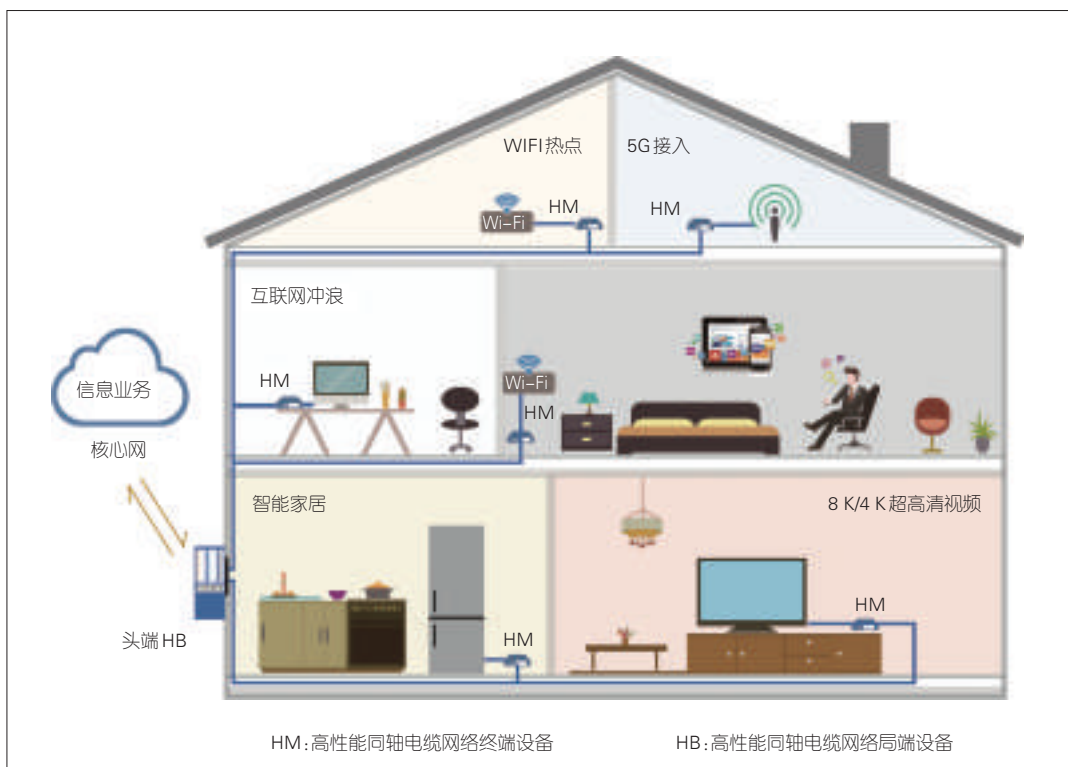
4 K/8 K 超高清视频这一高带宽业务的发展使得传统的广播电视技术和无线 WiFi 都捉襟见肘,整个信息网络需要实现 IP 化、宽带化,并提供广播级服务质量保证。同轴接口作为离电视机等用户终端最近的接口,具有先天的传输优势;而基于 HINOC 的光纤同轴混合接入技术可同时发挥光纤和同轴接口的泛在优势,为超高清视频业务提供完美的解决方案。

### 4.2 5G 室内渗透与深度覆盖

5G 技术是针对未来爆炸性增长的移动数据流量、海量设备连接、各类新业务和应用场景等需求提出的新一代移动通信技术,其力主创建“万物互联”的新世界。在 5G 时代,超过 80% 的流量将来自室内用

户需求,室内移动网络的部署和覆盖能力将成为运营商在 5G 时代的核心竞争力之一。

5G 工作频段较高,室外宏基站覆盖能力有限,而 5G 重要的应用场景增强移动宽带(eMBB)需要对热点的区域保证较高的传输容量(0.1~1 Gbit/s),这对于网络覆盖和承载网络能力提出了很高的要求<sup>[7]</sup>。在这一背景下,实现室内多点覆盖和超密集组网成为 5G 网络的重要组网方式,具有独立的射频和基带功能的小基站在未来 5G 室内网络建设将成为重要的设备形态。小基站的建设需要在室内建立多个向上连接核心网的信息入口,重新部署光纤或者 6 类网线虽在技术上可行,但对于密集住宅楼宇室内施工难度和成本较高。同轴电缆网络由于其潜在带宽大,接入节点海量,可以作为 5G 室内渗透和深度覆盖的重要入户信息通道。目前成



► 图6  
光纤同轴混合接入技术的  
典型应用场景

熟的 HINOC 2.0 接入技术可支持单通道 1 Gbit/s 双向通信,平均延迟小于 2.5 ms,完全可以支撑室内小基站向上的控制和业务传输通道。演进版本 HINOC 3.0 技术则将支持 10 Gbit/s 传输带宽、小于 1 ms 的平均延迟,也将更好地支撑 5G 的室内渗透和深度覆盖。实现同轴电缆的 5G/超 5G (B5G) 室内渗透解决方案的产业化,有利于未来 5G 网络的商用化应用和推广。

### 4.3 智慧家庭

随着物联网、智慧家居、智能安防、超高清视频分发等多样化业务的逐步普及,在家庭内部建立一个高速可靠的信息通信网络,实现室内多个接入节点和外部入口之间的高速互联互通日趋重要。虽然无线 Wi-Fi 接入是用户最后一段的首选,但是由于其开放的通信环境,相互干扰日趋严重,且其竞争共享的信道分配机制无法保证超高清视频分发、安防监测控制、物联网控制等高等级业务传输,所以必须有可靠的室内有线网络作为家庭网络的基础支撑。其他传输介质由于其低频受干扰强、无法实现通信带宽的持续升级等问题,无法作为未来家庭网络的承载主体。而同轴电缆由于其已泛在部署、安装方便、带宽升级潜力大、支持总线型组网部署等优势将成为未来智慧家庭网络中连接

各个房间的通信媒质首选。HINOC 技术作为当前综合成本最低,商用最成熟的同轴接入技术,将在智慧家庭网络组建中发挥关键性作用。

### 5 结束语

基于 HINOC 的新型光纤同轴混合接入技术可以充分发挥同轴电缆网络“信道容量大、入户率高、室内接口广泛”的优势。在光纤分配网段,采用 10 G 无源光网络技术,未来可向 25 G、40 G、100 G 逐步升级。而在同轴入户网络,选择无论从传输性能、QoS 保证、技术演进能力还是部署成本、网络管理运维能力等方面都表现俱佳的 HINOC 同轴宽带通信技术,未来可进一步提升 HINOC 网络容量到 10 Gbit/s。此外,基于 HINOC 技术,还可以利用同轴电缆构建室内高速互联网络,开展 4 K/8 K 超高清视频传输、5G 渗透和深度覆盖、智能家庭网络等多种场景的新业务部署和应用。

#### 参考文献

- [1] NGB 宽带接入系统 HINOC 2.0 物理层和媒介接入控制层技术规范:GY/T 297-2016[S]. 国家新闻出版广电总局,2016
- [2] RICHARD V N, RAMJEE P, RICHARD V. OFDM for Wireless Multimedia Communications[M].USA: Artech House,1999
- [3] ZHAO H, LI J H, ZHU P K, et al. Weighted Inter-Frame Averaging-Based Channel Estimation for CO-OFDM System[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(6): 7902807. DOI: 10.1109/jphot.2013.2292355

- [4] Broadcom. Full-Band Capture Cable Digital Tuning[R]. 2011
- [5] ZHANG Z S, LONG K P, VASILAKOS A V, et al. Full-Duplex Wireless Communications: Challenges, Solutions, and Future Research Directions[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(7): 1369. DOI:10.1109/jproc.2015.2497203
- [6] 工业和信息化部,国家广播电视总局,中央广播电视总台.超高清视频产业发展行动计划(2019-2022年)(2019-03-01)[2019-00-00]. [EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757021/c6660657/content.html>
- [7] 中国联通,华为.面向 5G 的室内覆盖数字化演进白皮书[R]. 2018

#### 作者简介



赵辉,北京瀚诺半导体科技有限公司总工程师;主要研究方向为同轴电缆高速宽带通信和 5G 移动通信;参与起草中国行业标准 2 项,发表 SCI 论文 3 篇、会议论文 3 篇,授权专利 14 项。



刘跃,北京瀚诺半导体科技有限公司芯片设计主管工程师;主要研究方向为同轴电缆高速宽带通信和通信基带核心芯片设计;发表文章 9 篇,其中第一作者 6 篇,授权专利 1 项。



张诚,北京大学信息科学技术学院电子学系工程师;主要研究方向为同轴电缆高速宽带通信和微波光子学;参与起草中国行业标准 2 项,发表 SCI 论文 14 篇、会议论文 34 篇,申请专利 11 项。



# 下一代光接入网的核心光电芯片技术

## Core Optoelectronic Chip Technology for Next Generation Optical Access Network

陈雷/CHEN Lei

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

**摘要:** 50 G 无源光网络(PON)已经成为下一代光接入网的主要技术。该技术的实现有多种技术途径,采用高阶调制4电平脉冲幅度调制(PAM4)技术和不归零码(NRZ)技术是最重要的2种实现方式。采用高阶调制PAM4技术,可以降低对光芯片的带宽要求,降低光芯片的成本,但需要额外增加具有数字信号处理功能的电芯片。采用NRZ技术,则不需要增加其他功能的电芯片,但需要使用高带宽的激光器和探测器光芯片,这种高带宽的光芯片开发难度大,成本高。

**关键词:** 下一代光接入网; 50 G PON; PAM4; NRZ

**Abstract:** 50 G passive optical network (PON) has become the main technology for the next generation of optical access network, and there are many technical approaches to implement 50 G PON. High order modulation 4 pulse amplitude modulation (PAM4) and non-return to zero (NRZ) are the most important technologies of 50 G PON implementation. By using high-order modulation PAM4 technology, the bandwidth requirement and the cost of optical can be reduced, but the electric chip with digital signal processing function needs to be added. NRZ technology does not need to add electrical chips with other functions, but needs to use high-bandwidth lasers and detector optical chips, the development of which is difficult and costly.

**Key words:** next-generation optical access network; 50 G PON; PAM4; NRZ

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190927.1139.002.html>

网络出版日期: 2019-09-27

收稿日期: 2019-08-08

### 1 下一代高速光接入网的发展

近年来,在“三网融合”和“光进铜退”政策的大力推动下,中国光接入网的接入用户数量和产品覆盖率得到了飞速发展。截至2018年,中国大部分中心城市都已经基本实现光纤到户(FTTH)或者光纤到楼(FTTB)。据统计,中国已经成为了全球光接入用户数量最多

的国家。由于市场规模效应的驱动,近些年来中国的光接入网产业以及光接入网技术都进入了快速发展的轨道。

光接入网的技术标准是从最早的宽带无源光网络(BPON)开始,2003年国际电信联盟(ITU)制定了吉比特无源光纤网络(GPON)标准。随后,电气和电子工程师协会(IEEE)于2004制定了以太网无源

光网络(EPON)标准。经过10余年的发展,到2019年光接入网先后发展形成了10 G EPON、非对称10 G PON第1阶段(XG-PON1)、40 G PON第2阶段(NG-PON2),以及对称10 G PON(XGS-PON)4种不同类型的标准,速率分为1.25 Gbit/s、10 Gbit/s、40 Gbit/s。图1是光接入PON的标准演进路线图。除了这些主流的国际标准以外,根据中国

市场的特殊需求,还衍生出了一些自定义的标准,例如:混合型无源光网络(COMBO PON)标准。

2015年9月,IEEE成立NG-EPON 研究组,确定研究目标为实现 25 G/50 G/100 G 对称及非对称的下一代 100 G EPON 系统。2015 年 11 月,IEEE 802 全会成立正式 IEEE 802.3ca 100 G-EPON 工作组并确定标准时间表。2018 年 ITU 正式发布 10 G PON 之后的下一代 PON 技术为单波 50 G PON,50 G PON 正式成为了各标准组织及企业的主要研究内容。

## 2 下一代光接入网技术路线

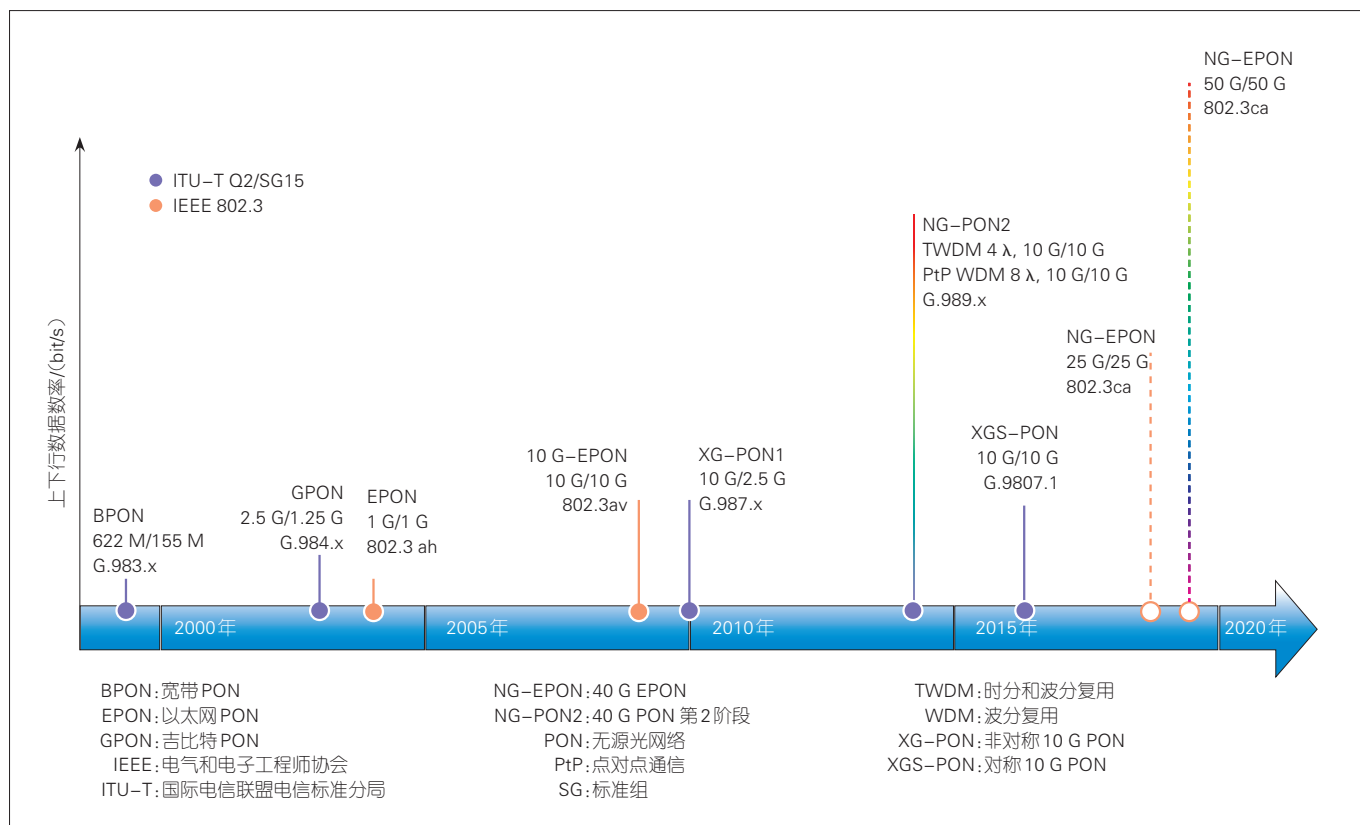
实现单波 50 G PON 的技术路线主要分为 2 种:一种是在光器件

带宽受限的条件下,使用高价调制技术;第 2 种则是延续以前 1.25 G/10 G 发展的路线,采用 50 G 不归零码(NRZ)幅度调制技术。

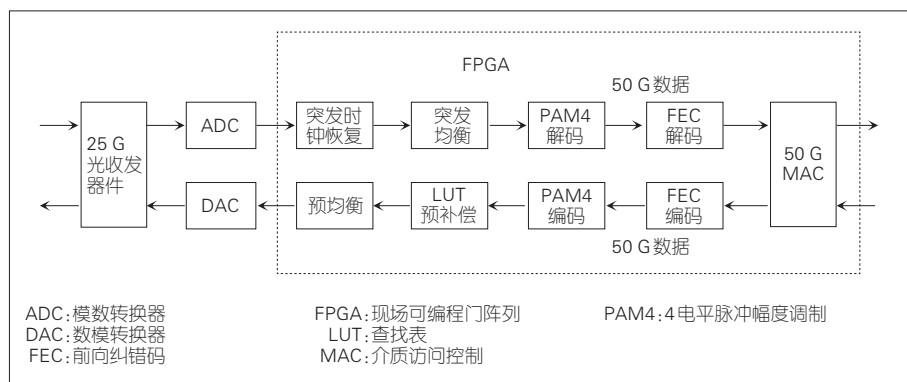
采用高阶调制技术可以降低系统对光器件的带宽要求,降低光芯片的成本。低带宽的光芯片和电芯片产业链成熟可用,也可以快速形成产品并商用化。当前主要可选的调制技术包括双二进制码(DB)、4 电平脉冲幅度调制(PAM4)信号、离散音频调制(DMT)等。PAM4 技术是高阶调制技术的首选方案,具体如图 2 所示的 50 G PAM4 原理框图。采用 PAM4 技术存在需要突破的难点:(1)采用 PAM4 高阶调制技术的信号接收端灵敏度比幅度调制技术的要低,无法满足接入网的高

功率预算要求;(2)高阶调制技术需要使用数字信号处理技术(DSP)芯片,调制/解调制算法比 NRZ 复杂很多,增加了算法成本。虽然近年来,高阶调制技术已经在城域、骨干网实现规模商用,针对数据中心应用的以太网技术也进行了相关技术研究和标准化,但在具有高功率预算、上行突发等特点的接入网领域的应用还处于技术研究阶段。

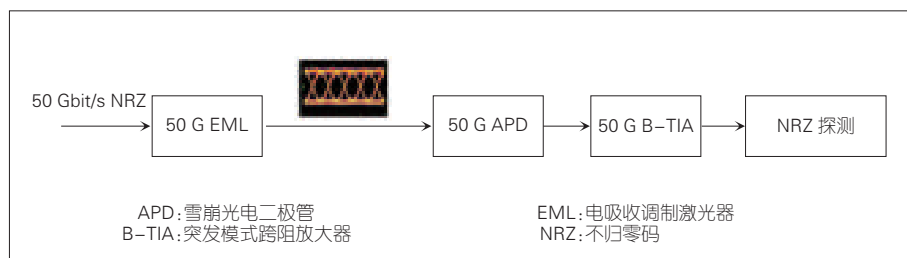
采用 50 G NRZ 幅度调制技术是一种可延续的技术路线。从技术发展的角度来看,50 G NRZ 幅度调制技术的整体架构非常简单,只需要将原来的 10 G 速率对应转化为 50 G 速率即可。具体如图 3 所示的 50 G NRZ 的原理框图,该方案不需要增加模数转换器(ADC)和 DSP 芯



▲图1 PON 标准的演进



▲图2 50 G PAM4的原理框图



▲图3 50 G NRZ的原理框图

片。但这种技术路线也存在技术上的难点:(1)50 G的光芯片当前发展遇到技术瓶颈,例如当前业界还没有企业能研发出50 G速率的雪崩光电二极管(APD)探测器芯片,因为研制的难度非常大;(2)满足50 G速率要求的光芯片、电芯片晶圆制造工艺良品率低,导致成本比10 G速率至少高出30%。总体上来说,满足单波50 G NRZ传输的上行突发、下行突发的光/电芯片都还处于实验室技术研究阶段。

### 3 下一代高速光接入电芯片关键技术

#### (1)前向纠错码(FEC)技术。

每一代PON的发展中,都需要考虑FEC技术。考虑到10 G EPON的技术演进,下一代单波长50 G PON的FEC会优先选择低密度奇

偶校验码(LDPC),并要求输出误码率(BER)优于 $10^{-12}$ ,输入误码率BER阈值在 $1e-2$ 或以上。FEC可以考虑采用软值判决,但编码冗余应小于18%(目标在16%以内)<sup>[1]</sup>。LDPC码技术在业界已经比较成熟,在WiFi、电缆数据传输业务接口规范(DOCSIS)、数字视频广播(DVB)等通信中都被应用,因此LDPC码的实现不存在技术障碍,具备实现的可行性。

虽然LDPC码应用已经有可参考的经验,但是将LDPC码应用到接入网中,还有很多地方需要研究。例如:LDPC码型的选择,长度、编码和译码等算法性能的优化,算法复杂度的简化都将成为了业界研究的主要点。其中,LDPC的成本和功耗与译码算法非常相关,它直接决定了电芯片的尺寸、功耗等,所以

突破LDPC的关键技术,可降低后期电芯片的成本。

#### (2)DSP技术。

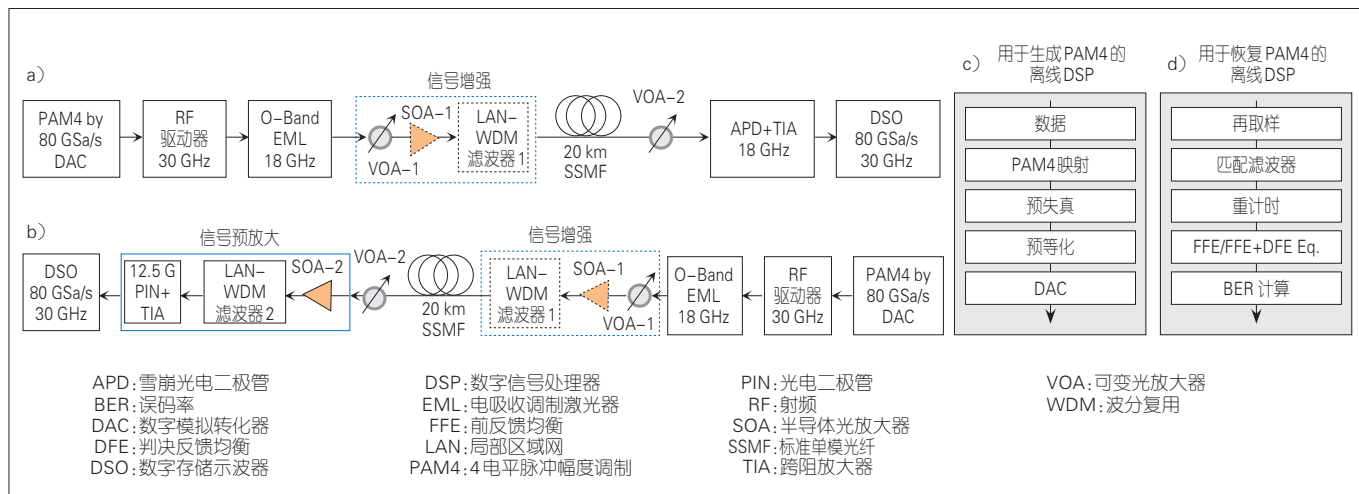
在50 G PON的关键电芯片中,DSP是最重要的。突发的时钟恢复和突发均衡则是实现DSP的最主要挑战。目前未有任何厂家对该方向作研究性支持或产品报道。基于2倍采样的全数字化突发时钟恢复,目前还仅处于实验阶段,但从离线实验和FPGA的验证结果来看:其性能基本理想,所以方案的可行性也得到了证明;但其突发均衡还需要进一步研究,通过降低序列长度,来加快收敛值得思考。另外,采用符号间隔采样的突发时钟恢复方法也有待进一步的技术验证。

在DSP芯片可获得性方面,目前未有支持PON系统的高级调制方案的DSP芯片。迫切需要产业界和学术界加强合作与交流,持续推动电芯片技术研发。

### 4 下一代高速光接入光芯片关键技术

当单波50 G采用高阶调制技术,可以直接使用25 G电吸收调制激光器(EML)/直接调制激光器(DML)激光器和25 G APD探测器。这2种光芯片当前在数据中心和以太网中已经大规模应用。

图4是50 G PAM4时分和波分复用(TWDM)PON在O-Band的链路框图。通过模拟仿真,已经证明PAM4技术可满足PR30链路预算代价需求的传输要求<sup>[2]</sup>。采用PAM4方案后,在发射下行,需要采用APD来接收,在接收上行则采用



▲图4 50 G PAM4的基于时分和波分复用的PON在O-Band的链路框图

半导体光放大器(SOA)+光电二极管(PIN)的接收组合方式。上下行发射都只需要采用18 GHz O-Band的EML激光器,可大大降低光芯片的带宽需求,节约光芯片成本。但是发射端需要增加SOA芯片,来增加光功率。由于高阶调制技术对器件线性度要求很高,所有要求激光器也是线性PAM4的激光器<sup>[3]</sup>。

采用PAM4技术后,接收机的灵敏度会低于采用不归零码(NRZ)方式的接收灵敏度。该PAM4对光反射非常敏感,如果有高功率预算要求,例如32 dB功率预算,采用PAM4的光器件来实现则显得非常困难。

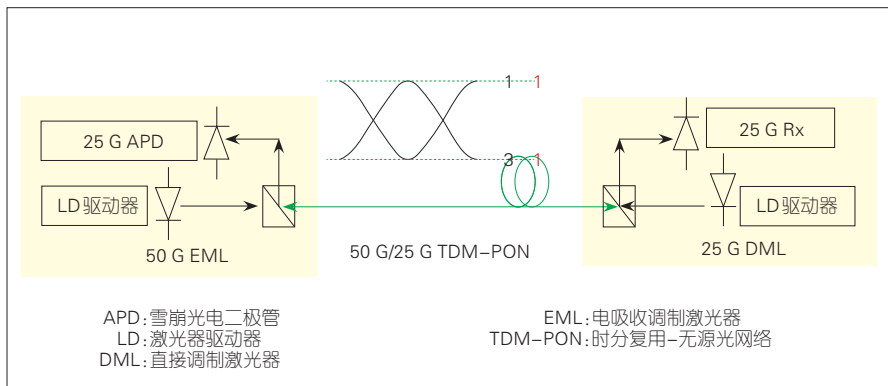
当单波50 G采用NRZ幅度调制技术时,则需要使用50 G EML和50 G APD。ITU于2018年率先规定50 G PON将采用NRZ幅度调制的方式,其下行波长采用1 342 nm波长,具体结构图5所示。

图5中的方案必须采用50 G的EML激光器和50 G APD探测器。由于传输速率越高,激光器在O-

Band的传输色散代价就越大。接入网通常需要传输20 km,色散代价将会严重影响光信号传输距离,这对激光器的研发将带来巨大的挑战。为了解决这个问题,通常还需要再进行光域或电域的色散补偿。

当前50 G探测器APD设计难度最大,主要难点在于探测器带宽的提高,因为探测器的带宽受限于探测器的制作工艺。当前PD探测器所用的工艺一般是锗硅SiGe或者磷化铟INP,2种工艺在带宽的设计上也存在差异。为了不受本身工艺带宽的限制,可以用SOA和PIN的方案来替代高带宽APD。PIN管

的设计很容易满足50 G带宽需求,但是PIN管的接收灵敏度比较低,能接收的最小光功率不满足PON的应用要求,所以必须在PIN管接收前端加入一级光放大,光放大可以采用半导体光放大器SOA。SOA是运用电流受激辐射的原理放大光信号<sup>[4]</sup>,只要注入电流,就可以实现光信号的增强放大。SOA通常具有较宽的带宽<sup>[5]</sup>,可以覆盖50 G带宽的需求。为了减小接收器件的尺寸,需要将SOA芯片和PIN芯片进行高度集成,在同一个工艺平台上进行耦合,但这种耦合工艺非常复杂。因为SOA波导尺寸很小,而



▲图5 50 G不归零码光芯片结构图

PIN管接收面比较大,两者进行光学对准耦合会存在比较大的耦合损耗,从而影响信号接收的灵敏度。实现低损耗的波导耦合是一个非常大的技术难点。

## 5 结束语

下一代光接入网络的发展已经进入到了50 G PON时代。50 G PON由于速率的提升,对于光芯片、电芯片的设计都提出了巨大的挑战。50 G PON可以使用多种技术方案,高阶调制技术可以降低光器件带宽要求,节约器件成本。传统的NRZ幅度调制技术可以延续上一代PON的技术思路,设计原理简单;高阶调制技术却增加了电芯片的设

计难度;NRZ幅度调制技术则增加了光芯片的设计难度。无论选用那种技术路线,50 G PON都将寻求一种低成本、可实现的方式。

Networks: A Practical Perspective [M]. USA: Morgan Kaufman, 1998

### 参考文献

- [1] LAUBACH M, YANG S H, RYAN H, et al. FEC Proposal (LDPC) for NGEPON: IEEE 802.3ca [S]. 2017
- [2] ZHANG J, WEY J S, YU J J, et al. Symmetrical 50-Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON in O-Band with DSP and Semiconductor Optical Amplifier Supporting PR-30 Link Loss Budget[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). USA: IEEE, 2018
- [3] TAO M H, ZHOU L, ZENG H, et al. 50-Gb/s/λ TDM-PON Based on 10G DML and 10G APD Supporting PR10 Link Loss Budget After 20-km Downstream Transmission in the O-Band [C]// 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). USA: IEEE, 2017
- [4] MYNBAEY D K, SCHEINER L L. 光纤通信技术 [M]. 徐公权,译. 北京:机械工业出版社
- [5] RAMASWAMI R, SIVARAJAN K. Optical

### 作者简介



陈雷,中兴通讯股份有限公司短距离/互联光模块产品经理,国家02重大专项“高速低功耗硅基光互连共性工艺和集成芯片研究”子课题项目负责人;长期从事10 G PON、NG-PON2、50 G PON等标准技术预研工作,现从事高速光模块/光器件的研究与开发工作;多次主持完成高速器件/光模块的开发设计以及多款中兴通讯自研光/电芯片的研发与测试工作,包括具备光纤检测功能的集成电芯片、25 G高速突发跨阻放大器芯片等,在光通信电芯片开发方面具有丰富的经验,先后多次参与国家“863”项目、02重大专项、国家电子发展基金项目;已申请国家专利7篇。

## 综合信息

### 中兴通讯技术杂志社第24次编委会议隆重召开

2019年8月17—18日,来自国内外高校、运营商及企业界的近百位ICT专家、学者齐聚山东烟台,参加“中兴通讯技术杂志社第24次编委会议暨2019通信热点技术研讨会”。中兴通讯董事长李自学、总裁徐子阳等领导

和专家出席会议。编委会上,李自学董事长致欢迎辞,代表公司感谢业界专家学者长期以来对中兴通讯的帮助和支持,感谢编委们为公司刊物做出的无私奉献;中兴通讯已经走出困境,正在全方位打造核心竞争力;希望刊物继续发挥桥梁和纽带作用,促进学术交流,促进产学研合作,为信息通信产业的发展创造更大的价值。

编委们对中兴通讯的经营现状、未来发展非常关注。徐子阳总裁做了“携手赢未来——5G时代的中兴通讯发展战略”的演讲,就中兴通讯的经营现状、5G发展规划、公司战略方向等做了明晰的介绍,通过高含金量的内容、形象的比喻和有感染力的语言,消除了专家们对中兴通讯的担心,极大增强了与会代表对中兴通讯未来发展的信心。专家们表示,将一如既往地关注、支持中兴通讯的发展。

杂志社常务副总编黄新明做了杂志社年度工作报告,介绍了编委换届情况。代表们充分肯定编辑部的工

作和刊物取得的成绩,新增编委表示将尽力为刊物发展做贡献。会议还讨论了中英文两刊2020年组稿计划。

在通信热点技术研讨会上,郑纬民、祝宁华、李少谦、张跃平等18位海内外专家发表前沿技术演讲,分享了各自专业领域的最新研究成果。

一年一度的杂志编委会,吸引了越来越多的海内外专家学者前来参会。刊物是媒介,汇聚八方资源;刊物是平台,促进产学研合作。这样一个专业、平等、开放的交流平台,正在为行业进步、技术创新和企业发展创造越来越大的价值。





# 高速可见光通信技术的挑战与展望

## The Challenges and Prospects of High-Speed Visible Light Communication Technology

迟楠/CHI Nan, 胡昉辰/HU Fangchen,  
周盈君/ZHOU Yingjun

(复旦大学, 上海 200433)  
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190925.1651.004.html>

网络出版日期: 2019-09-26

收稿日期: 2019-08-15

**摘要:** 目前, 高速可见光通信(VLC)系统在器件、算法、组网等方面均存在着一定的技术瓶颈, 需要有针对性地突破这些瓶颈, 进一步提升其系统速率, 使之在未来 B5G/6G 架构中发挥重要作用。阐述了现阶段高速可见光通信面临的若干挑战, 并对其未来前景提出了展望。

**关键词:** 光通信; 可见光通信; 5G/B5G

**Abstract:** At present, high-speed visible light communication (VLC) systems have certain technical bottlenecks in terms of devices, algorithms, networking, etc. If these bottlenecks can be broken through in a targeted manner, the system speed will be further increased, and VLC will play a pivotal role in the future B5G/6G architecture. This paper describes several challenges and solutions for high-speed VLC at this stage, and proposes its future prospects.

**Key words:** optical communications; visible light communication; 5G/B5G

如今, 随着移动互联网的数据大发展以及 5G/B5G 技术的标准化和产业化, 通信技术不断进行着翻新与再创造, 随之而来的是虚拟现实、智慧城市、云计算、自动驾驶等。这些大数据业务在飞速发展的同时, 也对通信网络的数据承载能力提出了新的挑战。但在无线接入方面, 传统的无线通信正陷入现有无线频谱资源逐渐匮乏的困境中。在这种情况下, 一种新型的通信方式——可见光通信出现在了人们的视野中<sup>[1]</sup>。可见光通信是利用波长范围在 380 nm ~ 760 nm 的可见光作为信息的载体, 调制信号进行传输的一种新

型通信手段。可见光光谱带宽约为 400 THz, 远远大于现有的无线通信频谱, 如此巨大的带宽资源使得可见光通信能够具有高速通信的潜力。在现有 5G/B5G 频谱的瓜分下, 可见光通信技术的使用, 能够大大拓展现有的无线频谱资源, 有效缓解资源即将耗尽的燃眉之急。

可见光通信自问世起就得到了世界各国的广泛关注。2003 年, 日本成立了可见光联盟(VLCC), 已经发展成为一个研究可见光产业的国际组织。美国国家自然基金(NSF)成立的工程研究中心(ERC)也在研究可见光通信。与此同时, 欧盟的

欧盟第七框架协议(FP7)、5G 基础设施公私合作伙伴关系(5GPPP)项目中都重点支持了可见光通信。在中国, 科技部的重点研发计划都将可见光通信列入其中<sup>[2]</sup>。世界各国对可见光通信的重视是基于其在各个领域中的应用多样性。例如, 在未来 B5G/6G 的通信方式来临之际, 将照明与通信结合应用于路灯、车灯、室内照明等领域, 将为全社会构建一个覆盖范围广、成本低廉的泛在光通信网络; 在核电站等电磁敏感的区域中, 可见光通信是一种不可或缺的无线通信方式; 在军用通信中, 可见光通信可以抵抗无线电干扰,

实现空气、水域的远距离高速通信;可见光通信还可被运用在如医疗、航空、工业制造的众多特定场景中。可见光通信潜在的应用领域多样,用户数量巨大,将会带来非常大的经济效益,而如何实现更高速率的可见光系统也是当前的一个研究热点。

## 1 可见光通信系统的架构

可见光通信系统的基本架构是点对点系统<sup>[3]</sup>,近些年随着对通信容量的需求增大,可见光多输入多输出(MIMO)系统<sup>[4]</sup>也在逐步发展中。目前的点对点可见光系统主要由发射和接收2部分构成<sup>[5]</sup>,如图1所示。发射部分分为电学部分与光学部分,电学部分主要包括信号处理电路与发射机驱动电路,光学部分则包括发射机光学芯片以及光学天线。2部分之间的光电子器件的就是可见光通信系统的发射机,目前主要是发光二极管(LED)与激光二极管(LD)<sup>[6-7]</sup>。信号经过信号处理电路完成编码和调制之后,通过驱动LED/LD来实现对LED/LD的强度调

制,从而将电信号转换为光信号。接收部分同样包括光学部分和电学部分。光学部分主要包括接收光学天线和探测器芯片,目前主流探测器芯片为光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)。接收光学天线把尽可能多的光学信息聚焦到探测器芯片表面上。电学部分主要是信号处理模块,光电探测器将接收到的光信号转换为电信号,对信号进行解调制、解码等信号处理过程之后,恢复出原始的发送信号。

虽然可见光理论上有着超大的通信容量,但是其受限于现有发射接收机的材料器件、光学系统、数字信号处理算法等,因此进一步提升可见光通信系统的速率依旧充满挑战。

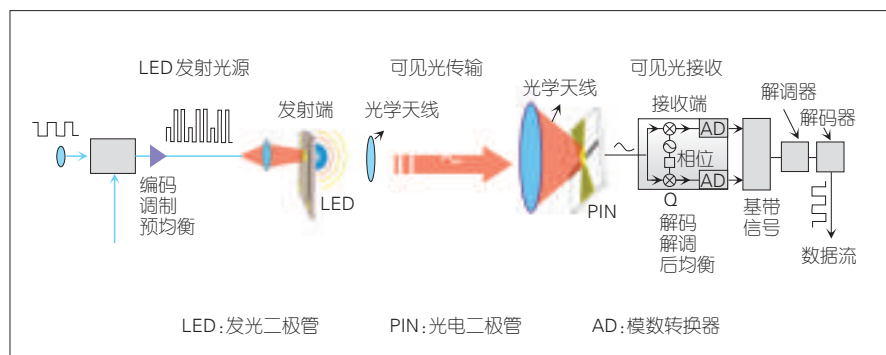
## 2 高速可见光通信面临的挑战

### 2.1 新材料与新器件

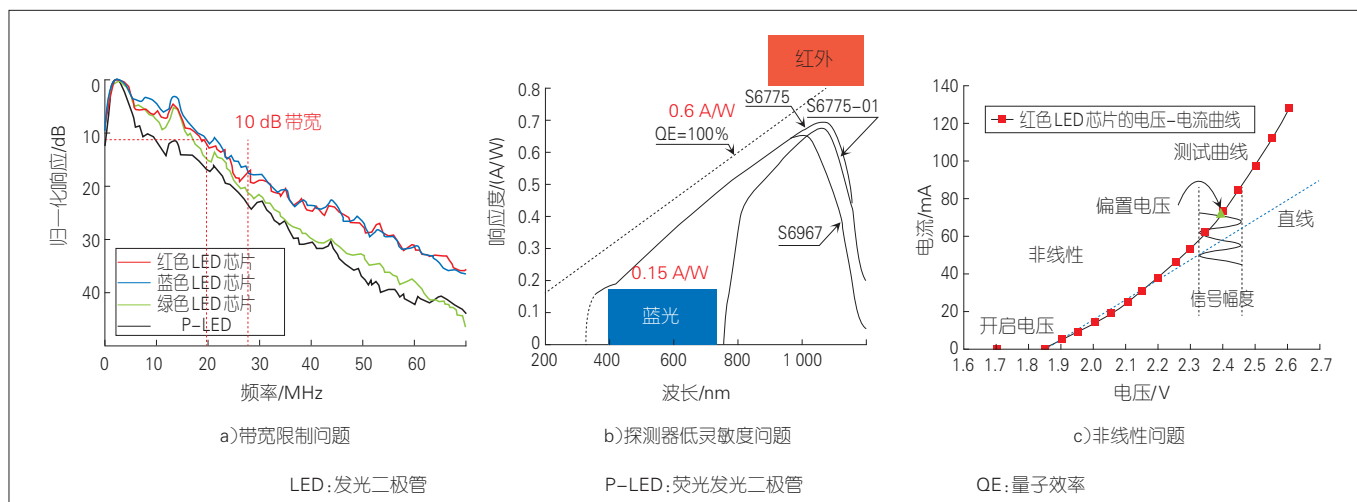
可见光通信的发射机和接收机近年来被广泛关注,主要的挑战如图2所示。LED和LD是

目前主流的发射机,LED被用作发射机主要是因为它的易耦合性、安全性以及低成本,但是现有的廉价商用LED的3 dB带宽小于100 MHz,无法满足高速通信的需要。LD作为发射机主要是因为激光具有相干性,所以天然地拥有大于吉咖(Giga)赫兹的带宽,但是其在使用的时候耦合对准较难且具有散斑效应,同时对于人眼的安全性也存在潜在的威胁。在接收机方面,PIN是目前成本较低的主流探测器,但其灵敏度低,不能进行远距离通信且响应带宽有限。APD是利用雪崩效应以提供较大放大倍数的光电二极管。虽然它的接收灵敏度很高,但是引入的噪声却很大,不适用于对信噪比要求高的应用场景中。在目前商用的接收机中,如果想要增大接收机的调制带宽,其噪声系数必然增大,与此同时光敏面的面积也会相应缩小,这为接收机端的光学天线带来了严峻的考验。因此,需要研制新的适用于未来高速可见光通信的发射机与接收机,以满足大带宽、低成本、易耦合、高灵敏度等需求。

为了实现可见光通信系统器件上的突破,世界各国许多研究学者都做出了相应的研究。南昌大学研制的硅衬底LED<sup>[8]</sup>能有效提升发射机的调制带宽。硅衬底LED单面发光,具有较好的一致性,垂直结构电极降低了载流子寿命,特殊设计的量子阱结构也提高了载流子的抽取效



▲图1 点对点可见光通信系统的基本架构



▲图2 高速可见光通信系统在器件上的挑战

率。除此之外,基于InGaN的高功率蓝光超发射二极管(SLD)是一种新型研制的光电二极管<sup>[9]</sup>,该种光电二极管有效结合了LED与LD的优点,不仅可以实现800 MHz左右的调制带宽,还能有效避免LD的散斑效应。但是目前这种器件的工艺还不成熟,只研制成功了蓝光和绿光SLD。台湾大学和阿卜杜拉国王科技大学(KAUST)采用新工艺和新材料实现了超高带宽的可见LD<sup>[10-11]</sup>。总的来说,未来的VLC发射机逐渐朝着传统器件更新化、新型器件完善化的方向发展。

在接收机方面,为提升PIN的灵敏度,集成PIN焦平面阵列成为很有潜力的研究方向。2015年,复旦大学首次设计了3×3硅基集成PIN阵列<sup>[12]</sup>,并实现了1.2 Gbit/s可见光通信。接收机端的光学天线一直是接收机集成化的一大阻碍,为简化光学天线,研究学者开始研究新型

材料与结构来替代传统透镜。复旦大学在2017年将柔性纳米材料首次应用为可见光通信系统的光学天线<sup>[13]</sup>,一定程度上简化了可见光通信的瞄准问题,并将速率提升了60%。

## 2.2 先进的调制编码和数字信号处理算法

高速可见光通信除了在器件材料方向面临挑战,先进的调制编码和数字信号处理算法同样至关重要。在有限带宽下,不断逼近通信容量极限是高速可见光通信面临的核心科学问题和最大挑战。

多维复用技术是进一步提升可见光通信容量的一种有效手段,如图3所示。具体来说,传统的相移键控(PSK)、频移键控(FSK)等典型的一维调制需要向多维调制方式发展,融合振幅、频率、相位、横向空间分布、偏振等多维度调制信号。同时,在可见光通信系统的不断优化

下,系统的信噪比也在进一步提升,运用高阶调制,例如64 QAM、128 QAM等,可以进一步提升频谱效率。波分复用、偏振复用等复用技术更是可以进一步提升系统容量。牛津大学、复旦大学、爱丁堡大学先后利用波分复用技术与先进的调制格式,分别实现了10.4 Gbit/s、10.7 Gbit/s、15.7 Gbit/s的多色LED高速可见光通信系统<sup>[8,14,15]</sup>。

但是,目前普通的波分复用(WDM)可见光通信系统并没有充分利用频带资源,不同频带之间的带隙浪费了频谱资源。另外,不完美的调制和编码方式,使得目前信道容量远没有到达香农极限。近年来,超奈奎斯特调制、概率几何整形、极化码等新技术不断涌现并成功应用于可见光通信系统中,进一步提升可见光通信系统的频谱利用率。

## 2.3 可见光异构组网

在未来应用中,可见光通信

与其他通信方式的异构融合是必不可少的一步,如图4所示,如何将可见光系统成功接入现有通信网络、发挥其优势并支撑室内多用户大容量通信,是未来可见光发展的又一大挑战。复旦大学于2014年实现了25 km光纤与75 cm可见光组网,通过32 QAM-正交频分复用(OFDM)调制方式实现了8 Gbit/s总吞吐量,可同时支持8个用户的接入<sup>[16]</sup>。这一实验证明了可见光系统可以兼容目前的骨干网,成为接入网中一种大容量的无线通信方式。

但是在实际运用当中,可见光异构组网依旧存在很多亟待解决的问题。首先是可见光通信的上行链路问题,若以可见光的方式回传,对于移动端的功耗要求太高。此外,上下行光路之间可能会互相干扰,所以如何合理地解决可见光的上行链路问题一直是人们在考虑的问题。在室内布设可见光接入点时,接入点数量要与用户数匹配。在多接入点接入时,会遇到互相干扰、移动性管理等问题。当现有的业务流到灯时,如何利用可见光通信顺畅地与这些业务对接,以及可见光与空间激光通信、太赫兹通信、毫米波通信和微波无线通信等通信技术如何共存和兼容,这些问题值得研究学者在未来进一步探索。

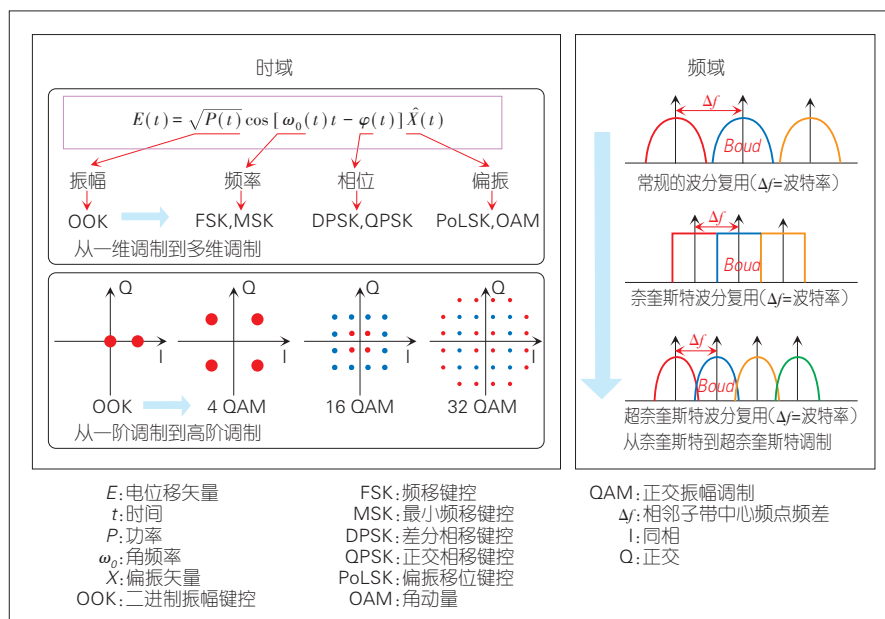
## 2.4 水下可见光通信

如图5所示,随着未来B5G/

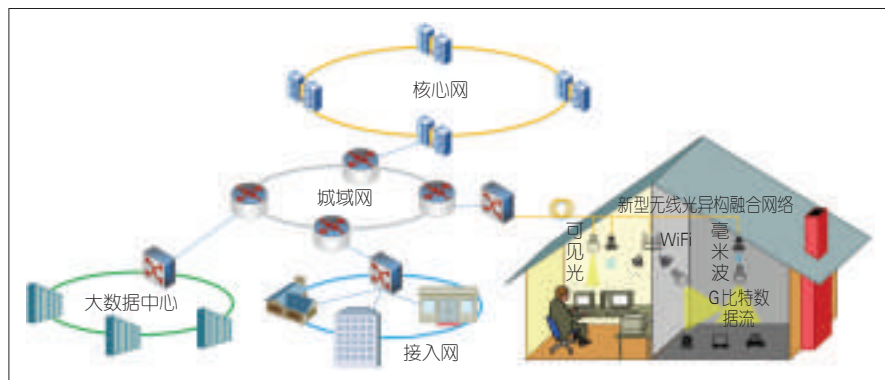
6G的发展,水下与陆上的通信网络不再孤立存在,它们将会形成一个智能通信网络,传感器、水下机器人、人类都需要进行水下活动,并进行必要的通信互联,所以水下无线通信的需求日益迫切。微波通信、声波通信是目前比较常用的水下通信手段,但是微波信号( $\sim 100$  MHz)在海水中里面的衰减极大,趋肤深度只有厘米级别。声波通信在海水中的穿透能力极强,但是通信带宽太低。所以为同时实现远

距离、高速率的水下无线通信,水下无线光通信逐渐发展起来<sup>[17]</sup>。目前水下无线光通信方式主要有两种:LD通信与LED可见光通信。KAUST已经实现了水下1.5 Gbit/s的20 m蓝光激光通信<sup>[18]</sup>。复旦大学则实现了总速率14.6 Gbit/s的1.2 m水下LED通信<sup>[19]</sup>。

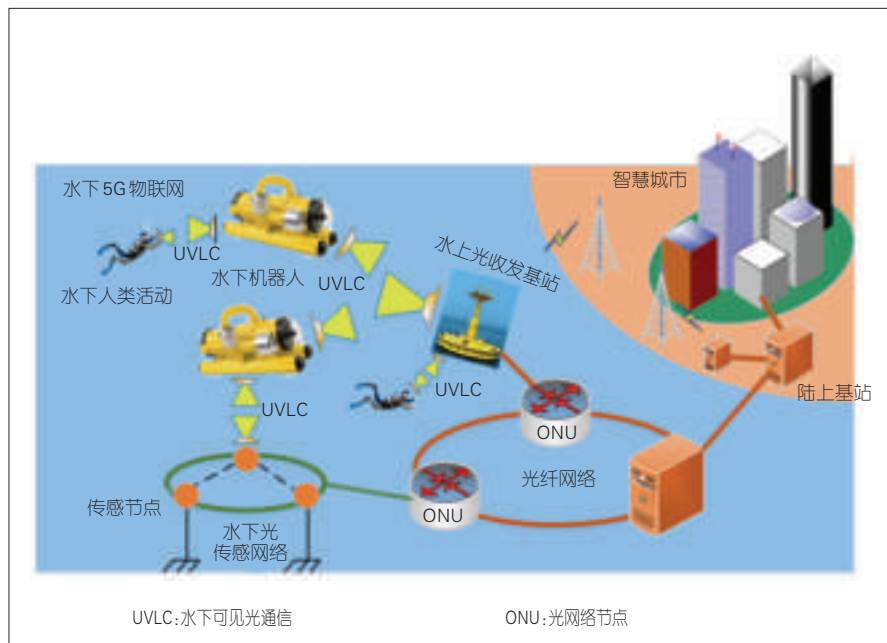
但是,水下无线光通信的挑战依旧严峻。首先,水下环境恶劣,吸收、散射以及湍流是影响水下光通信的主要环境因素。



▲图3 可见光通信系统实现高速调制的途径



▲图4 高速可见光通信系统在异构组网上的挑战



▲图5 水下高速无线光网络

其次,光通信器件复杂多样,波长跨度从紫外波段、可见光波段到红外波段,这些器件的物理光电特性都有很大区别。最后,水下通信节点经常涉及到运动目标,来自不同方向、不同运动速度、连续非连续干扰等都会对于信息高速传输产生致命影响,水下环境中应考虑相对广覆盖和大视场角接收问题。此外,目前的长距离高速水下无线光通信大部分停留在实验室阶段,所以如何在实际环境中实现更长距离、更高速率的水下无线光通信,是未来水下可见光通信面临的最大挑战。

### 3 高速可见光通信的展望

可见光通信是未来 B5G/6G 蓝图的重要组成板块,为进一步拓宽未来可见光通信的应用场景、提升其通信性能、突破应用

瓶颈,本节从4个方面给出对未来高速可见光通信前景的展望。

#### 3.1 新机理器件

为解决目前 LED 带宽限制、探测器灵敏度低与非线性等问题,未来高速可见光通信系统还需要新型的光源、探测器和光电器件。新型可见光光源需要有更宽的调制带宽、更高的光效,一些新型 LED 已经初有成果,例如微结构 LED、表面等离子体 LED 以及超辐射 LED。新型可见光探测器需要提高可见光的选择性吸收、提升内外量子效率和接收光通量,目前最新成果有复旦大学的 3×3 硅基集成 PIN 阵列和基于纳米图形荧光材料可见光吸收器。未来可见光通信系统作为一个独立的通信体系,还需要更多的独立光电器件,如外调制器、放大器、复用/解复用

器、光开关、集成收发器等。

#### 3.2 可见光信道建模

目前可见光信道建模都只是根据 LED 或 LD 器件本身光场分布与空间特性建立的。但是,实际的可见光信道还包括接收机频响特性、光学天线、空间光场分布、大气湍流、背景光噪声、散射衍射反射等。结合这些信息的可见光信道建模将在未来给高速可见光通信提供理论指导,对空间无线可见光通信、水下无线可见光通信都有重大意义。

#### 3.3 可见光协议组网

可见光通信作为一种理想的室内通信方式,能够根据室内空间大小设置合适的无线接入点,同时结合动态配置与固定配置解决室内多用户造成的互干扰、移动问题。为减少用户端的功率损耗,可见光上行链路可用红外或者无线通信进行替代,在室内组成混合网络。为解决业务流到灯的问题,可以尝试电力线、千兆以太网或者是光纤与灯相连,与局域网、广域网相连。

#### 3.4 全频谱智能通信

可见光通信将作为未来 B5G/6G 中一种可靠的通信方式,联同其他通信方式,组成全频谱网络,在特定场景中提供大容量、高速率、稳定可靠的无线传输。例如,智能可见光定位系统、室内可见光、毫米波无线混

合网络等。为适应未来系统复杂的数据处理,机器学习智能算法应当成为重点研究的对象,并被作为一种先进的信号处理算法应用在可见光通信系统中。例如,深度神经网络可进行非线性抑制、信道性能检测与调制格式识别等。因可见光和毫米波太赫兹通信都具有视距特性,未来网络需要对融合接收端进行精准定位和多天线协作通信,集感知、通信、智能、计算一体化。

## 4 结束语

本文中,我们详细阐述了高速可见光通信系统在器件、算法、组网等方面均存在的技术瓶颈,并对其未来发展提出了几点建议:(1)重点关注与发展可见光新机理器件,提升发射、接收机整体性能;(2)完善可见光通信系统理论基础,建立传输信道的数学与物理模型;(3)针对水下无线光通信应用场景,努力突破瓶颈;(4)重点研究可见光异构融合网络,兼容现有通信网络;(5)大力发展智能算法,适应未来全频谱通信网络。

目前,虽然可见光通信的商用尚待时日,但不可否认的是,它仍然具有非常重要的理论和实际应用意义。高速可见光通信技术在未来B5G/6G的应用前景是非常广阔的,只要认清当前技术形式,制定合理稳健的发展计划,可见光通信技术必定能够在人们未来的生产生活中大放光彩。

## 参考文献

- [1] CHI N, HAAS H, KAVEHRAD M, et al. Visible Light Communications: Demand Factors, Benefits and Opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5–7. DOI: 10.1109/MWC.2015.7096278
- [2] 李荣玲. 基于白光LED的可见光通信系统[D]. 复旦大学, 2014. 10.14016/j.cnki.jgzz.2016.09.069
- [3] WANG Y, TAO L, HUANG X, et al. 8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1–7. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2489927
- [4] QIAO L, LU X, LIANG S, et al. Performance Analysis of Space Multiplexing by Superposed Signal in Multi-Dimensional VLC System[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 19762–19772
- [5] CHI N. The Transmitter of the Visible Light Communication System[M]//CHI N. LED-Based Visible Light Communications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018: 13–38
- [6] WANG F, LIU Y, SHI M, et al. 3.075 Gb/s Underwater Visible Light Communication Utilizing Hardware Pre-Equalizer with Multiple Feature Points[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 1–9
- [7] FUJIEDA I, KOSUGI T, INABA Y. Speckle Noise Evaluation and Reduction of an Edge-Lit Backlight System Utilizing Laser Diodes and an Optical Fiber[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(11): 414–417. DOI: 10.1109/JDT.2009.2027612
- [8] ZHU X, WANG F, SHI M, et al. 10.72 Gb/s Visible Light Communication System Based On Single Packaged RGBYC LED Utilizing QAM-DMT Modulation With Hardware Pre-Equalization[C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California: Optical Society of America, 2018. DOI: 10.1364/OFC.2018.M3K.3
- [9] SHEN C, LEE C, Ng TK, et al. High-Speed 405-nm Superluminescent Diode (SLD) with 807-MHz Modulation Bandwidth[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20281–20286. DOI: 10.1364/OE.24.020281
- [10] SHEN C, GUO Y, SUN X, et al. Going Beyond 10-meter, Gbit/s Underwater Optical Wireless Communication Links Based on Visible Lasers[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC). Singapore: IEEE, 2017: 1–3. DOI: 10.1109/OECC.2017.8115036
- [11] HUANG Y, CHI Y, KAO H Y, et al. Blue Laser Diode Based Free-Space Optical Data Transmission Elevated to 18 Gbps over 16 m [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 10478. DOI: 10.1038/s41598-017-10289-y
- [12] LI J, WANG F, ZHAO M, et al. Large-coverage Underwater Visible Light Communication System Based on Blue LED Employing Equal Gain Combining with Integrated PIN Array Reception[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 383–388. DOI: 10.1364/AO.58.000383
- [13] DONG Y, SHI M, YANG X, et al. Nanopatterned Luminescent Concentrators for Visible Light Communications[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21926–21934. DOI: 10.1364/OE.25.021926
- [14] CHUN H, RAJHANDARI S, FAULKNER G, et al. LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(13): 3047–3052. DOI: 10.1109/JLT.2016.2554145
- [15] BIAN R, TAVAKKOLNIA I, HAAS H. 15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2418–2424. DOI: 10.1109/JLT.2019.2906464
- [16] WANG Y, YANG C, WANG Y, et al. Gigabit Polarization Division Multiplexing in Visible Light Communication[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1823–1826. DOI: 10.1364/OL.39.001823
- [17] 胡昉辰, 迟楠. 水下可见光通信的原理、关键技术与应用[J]. 中国照明电器, 2018, (1): 6–13. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6150.2018.01.002
- [18] SHEN C, GUO Y, OUBEI HM, et al. 20-Meter Underwater Wireless Optical Communication Link with 1.5 Gbps Data Rate [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25502–25509. DOI: 10.1364/OE.24.025502
- [19] SHI J, ZHU X, WANG F, et al. Net Data Rate of 14.6 Gbit/s Underwater VLC Utilizing Silicon Substrate Common-Anode Five Primary Colors LED[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2019: 1–3

## 作者简介



**迟楠**, 复旦大学教授、博士生导师; 长期从事高速光通信和高速可见光通信方面的研究, 主要研究高谱效率多维多阶光调制技术和数字信号处理技术; 获教育部自然科学二等奖、中国产学研合作创新一等奖、国际工业博览会创新奖等各1项; 发表SCI检索论文260余篇, 累计SCI他引2 400余次, Google引用6 100余次, 4篇ESI高被引论文, 出版专著5部, 获发明专利18项, 入选国家标准和IEEE标准提案。



**胡昉辰**, 复旦大学通信系在读博士生; 研究方向为高速可见光通信。



**周盈君**, 复旦大学通信系在读博士生; 研究方向为高速可见光通信。



# 5G 确定性网络的应用和传送技术

## Applications and Transmission Technology of 5G Deterministic Network

赵福川/ZHAO Fuchuan

刘爱华/LIU Aihua

周华东/ZHOU Huadong

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190916.1427.002.html>

网络出版日期: 2019-09-16

收稿日期: 2019-07-20

**摘要:** 高可靠低时延通信(URLLC)是垂直行业数字化转型的关键需求,重点分析了智能电网、工业互联网垂直行业应用对 5G 确定性网络的需求。研究了灵活以太网技术(FlexE)、时间敏感网络(TSN)、确定性网络(Detnet)等确定性网络关键技术。认为 TSN/Detnet 技术是后续确定性业务承载技术的发展方向。

**关键词:** 5G 承载; 确定性网络; 网络切片; URLLC; TSN; Detnet

**Abstract:** Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC) is the key demand of digital transformation of vertical industry, and the requirements of 5G deterministic network for Smart Grid and industrial Internet vertical industry applications are emphatically analyzed. In this paper, the key deterministic network technologies of Flex Ethernet (FlexE), Time Sensitive Networking (TSN) and Deterministic Networking (Detnet) are also studied. It is considered that TSN/Detnet is the development direction of following deterministic bearing technology.

**Key words:** 5G bearing; deterministic network; network slice; URLLC; TSN; Detnet

### 1 垂直行业对 5G 确定性网络的需求

5G 网络面向万物互联,除了传统的增强移动宽带(eMBB)互联网业务外,也引入了高可靠低时延通信(URLLC)业务。URLLC 业务覆盖了智能电网、智能工厂、车联网等应用场景,是垂直行业数字化转型的关键需求<sup>[1]</sup>。

URLLC 业务对承载网络的时延、抖动、丢包有严格要求,我们把承载这种严格要求业务的网络称为确定性网络。确定性网络的性能要

求在传统的互联网协议(IP)/多协议标记交换网络(MPLS)上难以真正满足,传统 IP 网络采用尽力而为的统计复用服务模型,通过传输控制协议(TCP)提供可靠应用的连接;但 TCP 协议会影响时延,其滑动窗口拥塞控制机制会引起业务突发,导致网络拥塞和时延抖动,难以提供确定性时延和时延抖动保证。

智能电网和工业以太网是 5G 垂直行业数字化转型的 2 个重要领域。本文中,我们将重点研究这 2 个领域对 5G 确定性网络的需求。

#### 1.1 智能电网

智能电网对安全性要求极高,特别是对继电保护要求严格。继电

保护有距离线路保护、方向比较保护、电流差动保护等,其中电流差动保护应用最广泛。简单来说,差动保护就是当输电线路正常运行时,输电线路两端的电流值相同;而当这条输电线路发生故障时,两端的电流就会不一致。当差动电流大于差动保护装置的预定值时,保护启动进而将被保护设备的各侧断路器跳开,使故障设备断开电源。

广域电流差动保护则是将该保护原理拓展应用到广域电力系统中,通过采集广域网中多测量点的电流信息进行差动保护的计算和故障定位。通信内容主要包含帧性质及保护起动元件逻辑状态等信息。国际电工委员会(IEC)61850-90-

基金项目: 国家科技重大专项  
(2017ZX03001016)

12 标准<sup>[2]</sup>6.2 节中规范了远程保护的通信性能要求,如表 1 所示。

不同的电力场景和应用,对通信的时延、抖动和丢包率都有确定性的要求,并对不同的时延要求定义了生存时间值 1(TTL1)至生存时间值 6(TTL6)的 6 个细分等级。在表 1 电流差异模拟比较中,要求时延 3~10 ms,抖动小于 100  $\mu$ s,2 个方向的不对称性时延小于 200  $\mu$ s,这 3 个功能场景对误码率(BER)也有很高的确定性要求。

在电网中根据传送电压等级不同,往往各种指标需求也不同。

IEC 61850-90-12 标准中 6.11 节把广域下对远程保护的通信要求按照电压等级进行了指标需求的细分,如表 2 所示。

同一个电流差异模拟比较功能场景,超高压(EHV)、高压(HV)、中压(MV)对通信的时延、抖动、不对称性时延、误码率以及时间同步精度等都有不同的确定性要求。

为了满足通信的可靠性、报文时延特性、数据完整性等要求,通信管道上目前主要采用同步数字体系(SDH)E1 方式,常用通道主要包括以 2 Mbit/s 速率复接 2 M(E1)接口

和以 2 Mbit/s 速率采用专用光纤通道。协议上一般采用基于面向对象的通用变电事件通信(GOOSE)这种特殊的通信机制<sup>[3]</sup>。GOOSE 通信采用一种特殊的映射方式:应用层定义协议数据单元,在经过表示层进行编码之后,直接映射到数据链路层和物理层,而不通过传输控制协议(TCP)/IP。传输模型简化为 4 层:应用层、表示层、数据链路层和物理层。为了避免类似 TCP 滑动窗口拥塞机制导致的突发,同时因为通信信息少,GOOSE 协议通过报文重发送机制解决丢包问题,同一个报文一般会发送几次。

▼表 1 远程保护的通信要求

模拟比较(差动电流)		命令	远程跳闸系统
方向	双向	双向	单向
报文大小	50 ~ 100 bits	少量 bits(开/关)	少量 bits(开/关)
报文周期性	3 ~ 12 次/周期	零星	零星
带宽	9.6 ~ 64 kbit/s	< 10 kbit/s	< 10 kbit/s
时延	< 3 ~ 10 ms	< 10 ms	< 10 ms
抖动	< 100 $\mu$ s	不要求	不要求
非对称时延	< 200 $\mu$ s	非关键	非关键
时间同步精度	< 100 $\mu$ s	非关键	非关键
误码率	< $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$	< $10^{-6}$	< $10^{-6}$
恢复时间	< 50 ms	< 50 ms	< 50 ms
不可用	< $10^{-4}$ 单一系统(HV); < $10^{-7}$ S 双冗余系统(EHV)	< $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$	< $10^{-4}$
HV: 高压		EHV: 超高压	

▼表 2 不同电压等级的远程保护通信要求

	A 等级	B 等级	C 等级	D 等级
应用场景	EHV	HV	MV	通用
时延	3 ms	10 ms	100 ms	1000 ms
抖动	10 $\mu$ s	100 $\mu$ s	1 ms	10 ms
非对称时延	100 $\mu$ s	1 ms	10 ms	100 ms
时间同步精度	1 $\mu$ s	10 $\mu$ s	100 $\mu$ s	10 ~ 100 ms
误码率	$10^{-7}$ ~ $10^{-6}$	$10^{-5}$ ~ $10^{-4}$	$10^{-3}$	/
不可用	$10^{-7}$ ~ $10^{-6}$	$10^{-5}$ ~ $10^{-4}$	$10^{-3}$	/
恢复时间	0	50 ms	5 s	50 s
HV: 高压		EHV: 超高压		MV: 中压

## 1.2 工业互联网

工业互联网网络是通过 5G、大数据、云计算、物联网、增强现实(AR)、工业机器人、人工智能等基础技术,构建起来的工业环境下人、机、物全面互联的关键基础设施<sup>[4-5]</sup>。

在工业互联网,自动化控制是最基础的应用,其核心是闭环控制系统。典型的闭环控制过程周期低至毫秒级别,所以系统通信的时延需要达到毫秒级别甚至更低才能保证控制系统实现精准控制,同时要确保可靠性。工业互联网对实时性的需求根据应用场合可大致分为 3 个等级:工厂级的控制需求要求响应时间在 1 s 左右即可,而过程级控制一般需要响应时间在 10 ~ 100 ms 以内,实时性要求最高的是运动控制,要求响应时间在 1 ms 以下,甚至达到几十微秒的量级<sup>[6]</sup>。

工业互联网企业内网相对成熟,主要通信技术包括以太网控制

自动化技术(EtherCAT)、时间敏感网络(TSN)等。EtherCAT保留了开放式系统互联(OSI)系统7层结构中的3层,即应用层(AL)、数据链路层(DL)和物理层(PL)。同时修改数据链路层协议,在实时通道内由实时介质访问控制(MAC)接管通信控制,避免报文冲突,简化数据处理,主要用于要求高同步高可靠性的运动控制领域。TSN采用标准以太网协议,可无缝集成现有以太网应用和标准的IT网络来提高易用性,同时带来了确定性时延和高可靠性,实现了工业互联网所需的远程诊断、可视化和修复功能。

工业互联网企业外网,当前主要利用既有的互联网或承载网搭建的企业专线,但在安全性、可靠性以及低时延低抖动等性能方面不能满足工业级的要求。工业互联网是连接人、机、物全面互连的基础设施,工业互联网的性能要求对网络技术提出了新的挑战。

### 1.3 行业需求小结

类似上述的智能电网和工业互联网,URLLC的垂直行业应用对网

络有严格的低时延、低抖动、低丢包率和高可靠性的承载需求。如表3所示,第三代合作伙伴技术规范(3GPP TS) 22.261标准<sup>[7]</sup>定义了URLLC类业务各种场景下端到端时延、抖动、可靠性、带宽、流量密度等多个网络性能。

为了满足上述网络性能需求,URLLC协议层面通常采用类用户数据报协议(UDP)的机制,并且将OSI系统中的7层架构精简为4层或3层。对网络性能提出了更高、更确定的指标要求,包括毫秒级别的时延、微秒级别的抖动以及6个9的可靠性等。如何实现低时延高可靠的确定性网络,是5G承载网络技术面临的新挑战。

## 2 确定性网络的传送技术研究

当前实现确定性网络的传送技术有2类,一种是L1层时分复用(TDM)模式的管道技术,另一种是L2/L3层时延敏感分组管道技术。

### 2.1 L1层管道技术难以满足L2/L3灵活颗粒确定性业务需求

传统的L1层管道技术类似同

步数字体系(SDH)/光传送网(OTN),采用TDM复用机制来实现的。为了适应IP业务的低成本扁平化建网需求,近期在国际电信联盟电信标准分局(ITU-T)立项的G.mtn标准引入了以太网物理编码子层(PCS层)的L1层管道技术,PCS层的L1层管道采用FlexE Shim层的时隙作为业务映射的容器,最小时隙为5 Gbit/s。这些技术都基于固定容器来承载业务,只能满足容器本身点到点的确定性能,受限于容器大小,管道无法满足分组业务灵活颗粒要求,尤其是小颗粒要求。

对于L1管道技术,业界也提出了更小颗粒管道的思路,比如支持比切片通道层(SCL)标准5G颗粒更小的1G颗粒管道,支持小于1G颗粒的Sub 1G OTN管道等。该技术虽然能增加L1管道技术对灵活颗粒L2/L3层业务的灵活性,但仍然无法解决L2/L3层业务确定性能的根本问题。该技术方向存在固有的缺陷包括:

(1)L1 TDM技术的限制。L1管道采用TDM复用技术,无法实现带宽的统计复用,如果是每业务每L1管道,必然导致网络带宽碎片化和巨大带宽浪费,另外大量TDM电路导致的实现成本、功耗和运维成本代价较大。L1管道存在固定大小TDM容器,该容器技术上的限制无法满足灵活确定性业务的动态带宽调整需求,而调整带宽容易导致业务受损。

(2)层网络架构的限制。L1管道并不感知L2/L3业务转发性能,L2/L3业务的转发性能由L2/L3分

▼表3 5G的URLLC业务性能指标要求

场景	端到端时延/ms	抖动	可靠性	带宽/(Mbit/s)	流量密度
离散自动运动控制	1	1 $\mu$ s	99.9999%	1 ~ 10	1 Tbit/(s·km <sup>2</sup> )
离散自动化	10	100 $\mu$ s	99.99%	10	1 Tbit/(s·km <sup>2</sup> )
自动远程控制	50	20 ms	99.9999%	1 ~ 100	100 Gbit/(s·km <sup>2</sup> )
自动监控	50	20 ms	99.9%	1	10 Gbit/(s·km <sup>2</sup> )
配电-中压	25	25 ms	99.9%	10	10 Gbit/(s·km <sup>2</sup> )
配电-高压	5	1 ms	99.9999%	10	100 Gbit/(s·km <sup>2</sup> )
智能运输系统基础设施回程	10	20 ms	99.9999%	10	10 Gbit/(s·km <sup>2</sup> )
触觉交互	0.5	/	99.999%	低	低
远程控制	5	/	99.999%	低 ~ 10	低

组层转发机制决定;因此,L1管道颗粒即使再小,仍然只能保证管道本身的性能,无法保证管道内业务的确定性能,尤其是当管道内承载不同类型的分组业务或者并发的分组业务时L1管道并不能精确感知。

(3)L1管道颗粒与管道速率的限制。L1管道的颗粒就是管道的转发速率,L1管道的颗粒度越小,转发速率也越小,转发时延会增大,比如1G颗粒的SCL管道转发时延比标准5G颗粒要大5倍。

(4)TDM技术兼容性的限制。L1管道采用TDM复用,有固定大小容器结构。这会带来不同颗粒管道互通的兼容性问题,比如1G颗粒以太网切片管道和标准5G颗粒的以太网切片管道是无法对接互通的。

L1层管道技术是为L2/L3层业务提供灵活连接的L1管道,为基础物理网络重构提供灵活拓扑连接。L1层管道技术聚焦于基础网络拓扑路径的连接和管道本身性能,而并不感知和保证它所承载的L2/L3层分组业务的性能。

## 2.2 TSN/Detnet是L2/L3灵活颗粒业务确定性承载技术发展方向

电气和电子工程师协会(IEEE)802.1制定的一系列TSN<sup>[8]</sup>标准,是以L2层以太网为基础,满足L2层时间敏感业务的新一代以太网标准。它除了满足传统音频和视频业务的确定性质量外,重点满足面向工业互联网等垂直行业应用的需求。Detnet<sup>[9]</sup>是国际互联网任务组(IETF)成立的支持L3层确定性网络工作组,支持在L3层满足大范

围和大规模确定性业务的组网需求。Detnet网络的转发面技术当前以TSN技术为基础,因此,本文转发面以TSN技术为研究对象。

与L1层管道技术不同,L2层TSN技术基于以太网分组转发架构,为了满足L2/L3业务的确定性能,针对每条L2/L3业务流维护每流的转发状态,从流量特征、流量监管、队列管理到业务调度等分组业务转发的各流程保证每业务转发性能,满足每业务灵活颗粒的要求。与L1层管道技术相比,TSN/Detnet技术具备如下优势:

(1)解决业务确定性能的根本问题。TSN/Detnet技术基于分组转发技术,在L2/L3分组层保证业务性能,从根本上解决了每业务性能保证的问题。

(2)适应业务灵活带宽颗粒的要求。TSN/Detnet技术基于分组业务特征维护每业务转发状态,能适应业务灵活带宽颗粒的要求,提升了转发效率。

(3)满足不同类型业务和并发业务的转发要求。TSN/Detnet技术通过业务识别、队列和调度等技术支持不同类型的业务和并发业务的转发性能,满足多业务承载的性能要求。

## 3 城域网 TSN 确定性转发技术研究

### 3.1 TSN 每业务流量监管(IEEE 802.1Qci/Qcr)

TSN技术为了保证每业务的转发性能,对每节点业务流量的输入

和输出都有监管的要求。首先业务的输入需要满足每业务流量监管(IEEE 802.1Qci)的要求,包括校验业务流的速率和包长,而出口为了不引入业务突发,也可以对每业务进行流量整形(IEEE 802.1Qcr)。

对于城域网,该要求与业务服务质量(QoS)(入口Policing和出口Shaping)要求类似;但是业务跳数和并发业务流数会大于TSN传统的局域网应用,同时也存在不同速率接口转换的影响问题。因此,TSN技术在城域网结合类似SCL的L1管道技术可以解决城域网L1拓扑和不同接口速率的问题,而且SCL标准5G颗粒度提供了较好的管道颗粒与转发速率的平衡。

### 3.2 TSN 业务确定性调度技术(IEEE 802.1Qbv/Qch)

TSN核心技术在于业务的确定性调度,该技术借鉴了TDM技术的思路增强以太网分组调度技术支持业务确定性转发性能,目前已标准化的主要包括基于时间门调度(IEEE 802.1Qbv)和循环队列调度技术(IEEE 802.1Qch,即循环队列转换(CQF))。

时间门调度将传统分组调度机制增强为基于时间的调度,调度单位为时间,每个调度队列根据设定的时间控制该队列门选择开关来确定是否允许被调度,从而实现业务队列基于时间的调度。如图1所示,时间门调度表T0时间内队列0,2,3,5,6,7门选择开关打开,允许发送业务,而队列1和4则关闭,不允许发送业务。

循环队列调度通过收发循环队列来支持确定性转发时延,最简单的循环队列由1个发送队列和1个接收队列组成。在设定的循环时间(Cycle)内,接收队列只接收将要被调度的业务报文,而发送队列只负责发送该队列的报文;下一个Cycle周期2个队列循环轮换,即原接收队列转换为发送队列,将前一个周期接收的业务报文发送出去,而前一个周期的发送队列用于接收本周期的业务报文。该机制通过保证了每个周期接收的业务报文必须在下一个周期内发送出去,因此,每个节点转发业务的时延是确定的,即正常为1个Cycle。CQF转发示意图如图2所示。

为了保证业务端到端的转发时

延,时间门调度机制和CQF调度机制,需要部署时间同步用于同步每跳转发的调度时间。因此,该技术对于城域网应用有较大的限制。一是业务经过路径的所有节点均需要部署高精度时间同步;二是在设置业务调度时间时,需要精确计算链路时延并逐跳设置精确的调度时间,带来了管理和控制工作的复杂性;三是城域同步精度和多跳处理,需要相对局域网较大的调度时间片来容忍调度误差,这将会稍增大该机制在城域网应用的转发抖动。

#### (1)确定性业务集中管控。

TSN/Detnet业务为了保证每业务确定性服务质量,需要依赖集中管控技术,包括集中配置业务端到端资源预留避免拥塞丢包、配置业

务监管参数和调度参数等。

集中管控技术(SDN Controller/NMS)可以实现TSN/Detnet业务的管控要求。首先通过每业务资源预留实现端到端转发资源保证,避免业务拥塞出现丢包和影响转发时延;通过合理的资源预留配合每业务流量监管,可以避免业务的拥塞和丢包。其次,TSN增强确定性调度技术针对每业务配置相关的参数也需要集中计算和配置,比如CQF每业务关联的Cycle,如图3所示。

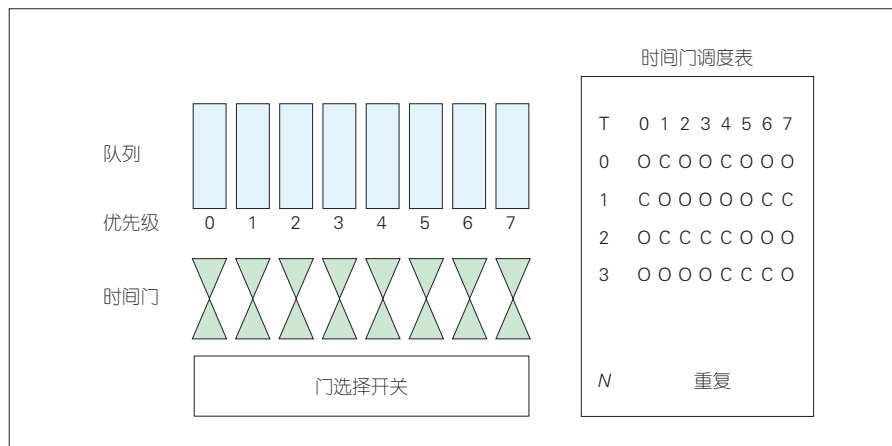
集中管控技术在城域网已经普遍应用,对于支持TSN/Detnet确定性业务,现有的集中管控技术只需增加对确定性业务的管控功能即可满足要求。

#### (2)TSN/Detnet技术在城域网的应用和局限性探讨。

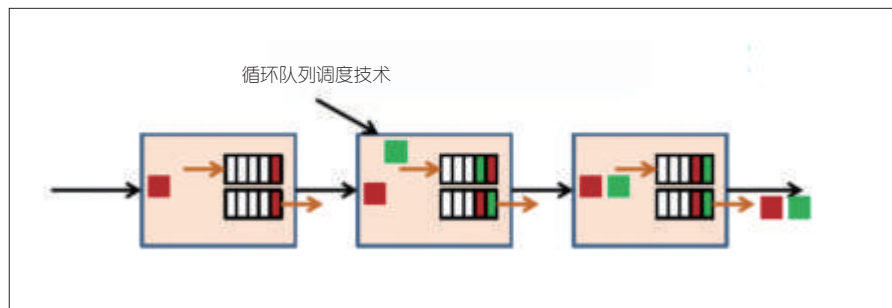
TSN技术标准IEEE在2018年底基本标准化,在局域网中逐步得到应用;Detnet技术IETF针对IP/MPLS封装和操作维护管理(OAM)部分正在进行标准化。但TSN/Detnet技术目前应用到城域网仍有局限性:

● TSN确定性调度目前基于时间进行,其端到端性能保证均要求部署时间同步;对网络也有要求,该要求在局域网中容易得到满足,但是对于城域网则受到一些因素的限制。不要求部署时间同步的确定性调度技术仍在研究中。

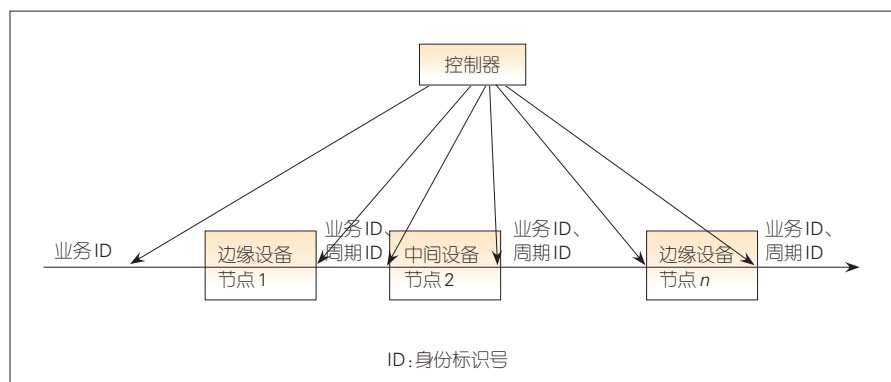
● TSN基于时间的调度在局域网中应用忽略链路时延,但是在城域网中链路时延基本不能忽略,这样给基于时间的调度机制增加了复杂性和额外的因素。



▲图1 时间敏感网络时间门选择调度示意图



▲图2 时间敏感网络2循环队列转换调度示意图



▲ 图3 时间敏感网络/确定性网络集中管控示意图

● TSN/Detnet技术需要维护每业务的转发状态,存在业务支持的规模和扩展性问题,当前有确定性转发的业务数量比较少,这个问题尚不突出。

● TSN 基于时间的调度机制受到一些分组特性的影响,比如包长大小对调度时间的影响,多流汇聚对业务突发和调度的影响等,复杂场景的TSN业务性能有待检验。

#### 4 确定性网络传送技术研究趋势

L1层技术是传统采用TDM复用的硬隔离管道技术,以SDN/OTN TDM管道为典型代表;FlexE技术<sup>[10]</sup>则在以太网接口架构下引入了类TDM硬隔离通道,中国移动切片分组网(SPN)SCL<sup>[11]</sup>进一步在以太网分组转发架构下引入了类TDM硬隔离管道。但是传统TDM管道只能保证管道本身性能的确切性,无法满足管道内业务,尤其是分组业务性能的确切性。而L2层以太网和L3层IP技术已经成为当前主流的业务承载技术,L2/L3层确定性承载技术逐步成为目前研究的热点。

TSN/Detnet 作为 L2/L3 层灵活

颗粒确定性业务承载技术,当前适合作为小规模确定性业务层承载技术应用到城域网中。该技术与管道层技术可以有机结合,满足面向5G灵活颗粒确定性业务承载需求和灵活切片的需求。在SPN网络中,管道层技术提供基于5G颗粒的网络灵活确定性连接,而TSN/Detnet技术提供灵活小颗粒确定性业务承载,是后续确定性业务承载技术的发展方向。

#### 5 结束语

目前,如何实现低时延高可靠的确定性网络,仍然是5G承载网络技术面临的新挑战。而在确定性网络的关键技术中,TSN/Detnet技术已经可以应用到城域网,满足业务对低时延和确定性服务质量的要求。尽管如此,TSN/Detnet技术仍有进一步提升的空间,包括降低确定性转发对时间同步的要求、解决业务包长变化对确定性转发和业务性能的影响等,这些技术的突破可以降低TSN/Detnet技术应用的限制并进一步提升转发性能。

#### 参考文献

[1] 师严,王光全,王海军. 面向5G的承载网需求及

关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018,24(1):17-20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.004

- [2] IEC. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation Part 90-12: Wide Area Network Engineering Guidelines: IEC TR 61850-90-12[S]. IEC, 2015
- [3] 唐瑜,王倩. 基于IEC 61850-90-1的广域电流差动保护信息模型与信息流分析[J]. 电气开关, 2013, 51(2): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2013.02.017
- [4] 张恒升. 工业互联网——重构网络架构的起点[J]. 中兴通讯技术, 2018,23(2):45-46. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.02.010
- [5] LI G, XU R, LI Z B, et al. Design of Wireless Energy-Harvested UHF WSN Tag for Cellular IoT [J]. ZTE Communications, 2018, 16(1): 11-17. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5188.2018.01.003
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业互联网发展行动计划(2018—2020)年[EB/OL]. (2018-06-07) [2019-09-09]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c6212005/content.html>
- [7] 3GPP. Service Requirements for the 5G System: 3GPP TS 22.261[S]. 2018
- [8] IEEE. IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group [EB/OL]. [2019-09-09]. <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [9] IETF. IETF Deterministic Networking (detnet) Working Group [EB/OL]. [2019-09-09]. <https://datatracker.ietf.org/wg/detnet/>
- [10] OIF FlexE. OIF-FLEXE-02.0-Flex Ethernet 2.0 Implementation Agreement. 2018
- [11] CCSA. 切片分组网(SPN)总体技术要: H-2018007963[S]. CCSA, 2019

#### 作者简介



赵福川,中兴通讯股份有限公司承载网产品线规划总工;主要研究方向为5G承载、PTN和IPRAN产品规划;承担国家重大专项1项;获得国家科技进步二等奖2项、省部级奖励2项等;申请专利10余项。



刘爱华,中兴通讯股份有限公司资深系统架构师;主要研究移动回传网系统架构和关键技术,包括2G/3G/4G和面向5G移动回传网传输体系和关键技术,并参加全球传送网相关标准讨论和制定工作;获得多项省市科技进步奖;提出10余项发明专利。



周华东,中兴通讯股份有限公司承载网方案总工;长期从事承载网研发以及产品规划等工作,主要研究方向为承载网建网方案以及PTN和IPRAN产品规划;申请发明专利2项。



# 新型硅基集成光隔离器的研究进展

## Research Progress of New Silicon-Based Integrated Optical Isolators

**摘要:** 光隔离器是保障光通信系统稳定运行的重要核心器件。目前,光通信器件在单个芯片上的集成是必然趋势,但光隔离器的集成仍然存在损耗高、隔离度差、集成工艺困难等诸多问题,复杂有源光通信器件片上集成的发展也因此受到了阻碍。概述了实现光隔离的几种有效方案,介绍了硅基集成光隔离器的最新研究进展,并对其未来的发展态势进行了展望。

**关键词:** 光学器件;硅基集成;非互易器件;光隔离器;波导结构

**Abstract:** Optical isolators are core devices to ensure the stable operation of optical communication systems. At present, the integration of optical communication devices on a single chip is an inevitable trend, but there are still some serious problems in the integration of isolators such as high loss, poor isolation, and difficult integrating process, which have hindered the development of on-chip integration of complex active optical communications devices. In this paper, several effective solutions for optical isolation and the latest research progress of silicon-based integrated optical isolators are introduced, and its future development is forecasted.

**Key words:** optical device; silicon-based integration; non-reciprocal device; optical isolators; waveguide structure

李明轩/LI Mingxuan<sup>1,2</sup>, 于丽娟/YU Lijuan<sup>1</sup>,  
刘建国/LIU Jianguo<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(1. Institution of Semiconductors, Chinese  
Academy of Sciences, Beijing 100083, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905011  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20191011.1425.002.html>

网络出版日期: 2019-10-11  
收稿日期: 2019-07-16

随着信息时代的发展,为了更好地满足其“爆炸式增长”的信息传输需要,人们对光纤通信模块、链路和系统的性能要求也在逐步提升。在光路中,由于种种原因会产生与正向传输光方向相反的反射光。例如,当光耦合进入光纤时,由于连接器和熔接点的存在,将会在这些端面 and 点处产生与原传输方向相反的反射光。反射波的光子回到器件之中时,会与半导体材料进行二次作用。这将干扰发光材料的正常载流子分布,导致光路系统间产生自耦合效应和自激励效应,造

成其他波长和模式光的产生,同时会破坏传输稳定性并给器件带来各种不良影响。这些不良影响包括:(1)对于直调激光器,反射波会给激光带来啁啾,导致光源信号的剧烈波动,调制带宽下降,十分不利于高速信号的长距离传输,严重时甚至会烧毁激光器;(2)对于光纤放大器,反射波的存在会增加噪声强度,从而使传输信噪比降低;(3)对于模拟信号传输系统,本身抗电磁波干扰能力就较差,反射波会严重影响通信质量;(4)对于相干光通信系统而言,反射波会增加载波信号的光

谱宽度并带来频率漂移,使系统无法满足外差法的条件从而不能正常工作。

光隔离器是使光信号只允许沿一个方向传播并能阻挡反射光的器件,又叫光单向器。它类似于电路中的“二极管”,能够用来防止光路中由于各种原因产生的反射光给正向传输光带来的不良影响。因此,光通信系统需要在这些端口处加入隔离器,这样能够有效地稳定系统的正常工作,从而保证信号的传输质量。衡量光隔离器性能的指标包括插入损耗、反向隔离度、回波损

耗、3 dB隔离度带宽、通带带宽、偏振相关损耗、温度特性等。为了能够使光隔离器在系统中发挥更好的效果,高反向隔离度、高工作带宽、高回波损耗、高稳定性和可靠性、低插入损耗等特性是光隔离器的主要发展方向。

近年来,硅基光电子学的进步和绝缘层上硅(SOI)波导的出现,使光电子器件正朝着小型化和集成化的方向发展。这更让人们看到了光通信系统在片上集成方面的发展前景,实现光电融合这一目标指日可待。与体型隔离器相比,集成光隔离器体积更小。特别是硅基集成的器件通过设计可以与其他器件一同进行流片生产,十分适用于集成光路中且有望进行大规模的生产。不仅如此,硅基集成的器件使用时不需要与光源进行对准,具有可靠性较高的特点。对于磁光隔离器而言,集成型磁光隔离器还具有所需的外加磁场强度更小等一系列优点;但由于缺乏一种有效且实用的光隔离器的集成方法,目前复杂的有源器件在光子集成芯片上的集成也受到了一些阻碍。

## 1 光隔离的实现原理

### 1.1 非互易传输

要实现光隔离的效果,需要打破光波在同一路径不同传播方向上的传播可逆性,使反向传输光具有与正向传输光不同的物理性质,即实现光的非互易传输。

对于一个双端口器件,假设左

端的电磁场分量为 $E_1, H_1$ ,右端的电磁场分量为 $E_2, H_2$ 。根据无源情况下的麦克斯韦方程,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j\omega\mu H \\ \nabla \times H = J + j\omega E \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\nabla$ 为哈密顿算子, $E$ 为电场强度, $H$ 为磁场强度, $j$ 为虚数单位, $\omega$ 为正弦电场的圆频率, $\mu$ 为磁导率, $J$ 为传导电流。

结合矢量公式,如式(2)所示:

$$\nabla \cdot (E \times H) = H \cdot (\nabla \times E) - E \cdot (\nabla \times H), \quad (2)$$

当电磁场的介电常数张量 $\hat{\epsilon}$ 和磁导率张量 $\hat{\mu}$ 满足如下公式时,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \hat{\epsilon} \cdot E = E \cdot \hat{\epsilon} \\ \hat{\mu} \cdot H = H \cdot \hat{\mu} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)化简,即可得到洛伦兹互易定理:

$$\nabla \cdot (E_2 \times H_1 - E_1 \times H_2) = 0. \quad (4)$$

通过推导洛伦兹互易定理可知,对于线性的非时变传输系统而言,破坏互易定理成立的条件使上述方程不为零,即可得到非互易的光传输,实现反向光的隔离。因此,可以从破坏对称性、破坏线性性以及破坏非时变性这3个角度去破坏互易定理,再根据物理性质不同的正反向光在同一种材料或结构中的传播特性不同,最终可实现隔离反向光的效果。光隔离器的研究最初源于磁光材料及其法拉第旋光效应的发现,根据有无磁光材料可将光隔离器分为磁光隔离器或非磁光隔离器。

### 1.2 磁光隔离器

使用磁光材料的隔离器为磁

光隔离器。磁光材料的介电常数张量是非对称的,因此采用磁光方法可以从破坏对称性的角度来打破洛伦兹互易定理,这也是光隔离重点研究的方向。衡量磁光材料隔离效果的物理参数为法拉第旋光系数。除此之外,材料的光学损耗也会影响到器件的最终性能。因此,较为理想的磁光材料需要同时具有比较大的法拉第旋光系数和比较低的光学吸收损耗,这种物理特性在铁石榴石这种材料中较为常见。

1958年,DILLON JR. J. F.等人首次发现钇铁石榴石材料 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)对于红外光具有较好的传递性和较低的传输损耗,可用于磁光隔离器的制造<sup>[1]</sup>。但由于当时材料的制备技术不成熟,在器件的实际制造方面几乎没有应用价值。20世纪70年代,液相外延(LPE)、射频溅射技术的进步促进了薄膜材料的广泛应用,磁光薄膜材料应运而生<sup>[2-4]</sup>。同时期,科学家们发现YIG中的 $Y^{3+}$ 离子在由少量抗磁性的 $Bi^{3+}$ 离子取代之后得到Bi:YIG,能够在通信波长1 300 nm和1 550 nm附近具有高出之前磁光材料几个数量级的法拉第旋光系数,且随着 $Bi^{3+}$ 离子含量的增加线性增大。1988年,GOMI M.等人发现了利用 $Ce^{3+}$ 离子取代YIG材料中的 $Y^{3+}$ 离子得到Ce:YIG<sup>[5]</sup>,对于相同波长的光波,相比Bi:YIG有其5~6倍的法拉第旋光系数,且温度系数更小。此后,产生了许多利用LPE和射频溅射制备的Bi:YIG和Ce:YIG薄膜材料制成的磁光隔离器,为隔离器的

小型化打开了局面。

传统体型光隔离器为法拉第旋光型隔离器,由2个偏振器和中间的磁光材料组成。光的非互易性传播通过磁光效应实现,即磁光材料在外加磁场下会产生法拉第旋光效应,原理如图1所示。假设光从左到右为正向传输,竖直方向的线偏振光经过左侧偏振器进入磁光材料,由于法拉第旋光效应使偏振方向从正向看过去逆时针旋转了 $45^\circ$ ,之后恰好通过 $45^\circ$ 放置的右侧偏振器输出。当反向光进入隔离器时,斜 $45^\circ$ 的线偏振光经过右侧偏振器进入磁光材料,由于法拉第旋光效应的非互易性会产生沿反向看过去的顺时针 $45^\circ$ 旋光,此时光的偏振方向和左侧偏振器的偏振方向垂直从而无法通过,由此可以实现对反向光的良好隔离。

上述体型隔离器要求进入隔离器的光波偏振方向是确定的,称为偏振相关型磁光隔离器。还有偏振无关型的光隔离器,即不要求光波的初始偏振态,这种隔离器能够适

用于更广泛的情况。

### 1.3 非磁光隔离器

非磁光方法的研究主要是为了解决磁光材料难以小型化和集成的弊端,除了打破对称性角度之外,还可以从破坏线性性和非时变性角度来打破洛伦兹互易定理。线性材料的物理特性是不随光的强度发生变化的;但对于一些非线性材料而言,不同的光强会导致材料的折射率随之变化。因此,对于正反向的传输光,非线性材料的折射率分布不同,从而实现非互易传输。另外,正反向的光在波导中传播还具有非时变性,即时间对称性,因此也可以考虑打破这种性质来制成隔离器。

## 2 光隔离器的集成

目前,商用的体型磁光隔离器具有相对良好的隔离性能,但是不能满足光通信器件小型化的需求,因此人们开始研究波导型的隔离器件。早期的研究者尝试用在石榴石衬底上的石榴石器件去研究波导器

件,涌现出了许多方法,包括:(1)利用模转换的方法改变反向传输光的传播模式;(2)利用非对称马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型波导和多模干涉型波导;(3)注入电流增大铁磁材料对反向光的吸收系数等<sup>[6]</sup>。其中某些方法也可以达到30 dB以上的隔离度和1 dB以下的损耗;但这些以磁光材料作为波导或以石榴石材料作为衬底制成的器件,还存在如相位匹配条件难以实现、具有形状诱导的双折射效应、传播损耗较大等缺点。

随着硅基光电子学的发展,尤其是SOI波导的出现,硅已经成为实现光电融合的首选材料。SOI损耗很小,目前的工艺技术允许其实现复杂和多变的光子集成回路,同时与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,加之调制器、放大器、探测器等器件均在硅衬底上进行集成制成光子集成芯片;因此,光隔离器在硅基平台上的集成是未来发展的重要方向。YIG材料的磁光特性良好,尤其是掺杂稀土离子 $\text{Bi}^{3+}$ 和 $\text{Ce}^{3+}$ 之后具有较高的法拉第旋光系数,目前也被广泛应用于光隔离器等磁光器件的制造。但石榴石材料难以集成在硅基光学芯片上,因为得到石榴石相需要进行热退火,会带来衬底之间的不匹配。因此,人们开始寻找各种无磁的硅基集成光隔离器的实现方法,同时也尝试在石榴石材料的集成工艺上进行突破。

### 2.1 键合磁光薄膜的光隔离器

2008年,日本学者MIZUMOTO

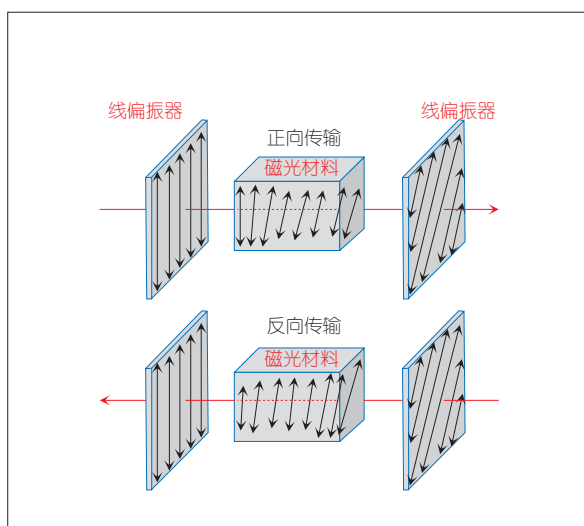


图1

法拉第旋光型隔离器原理

T. 等人首次采用直接键合的方法将 Ce:YIG 薄膜集成到具有 MZI 结构的 SOI 波导上, 其结构如图 2 所示<sup>[7]</sup>。在给 Ce:YIG 薄膜施加反向平行磁场的情况下, 光在器件中传播时具有非互易相移, 2 臂中的反向光由于 2 种相移相差奇数倍而干涉相消, 从而达到了隔离反向光波的效果。制成的器件在波长 1 559 nm 处达到最大隔离度 21 dB, 具有较大的工作带宽。

2011 年, TIEN M. C. 等人首次用键合磁光石榴石的方法实现了硅光环形隔离器, 结构如图 3 所示<sup>[8]</sup>。该隔离器包括 1 个环形谐振器、1 条直耦合波导和键合的薄膜 Ce:YIG。通过给磁光薄膜施加以环形谐振器为中心的径向磁场, 产生的非互易效应打破了环形谐振器的对称性,

使光波在顺时针 (CW) 和逆时针 (CCW) 传播时具有不同的传播常数, 因此有不同的谐振波长。如果正向和反向的透射光谱偏移了自由光谱范围的一半, 则可以实现和优化光学隔离。正向光传输为 CW 模式且为非谐振波长, 不会耦合进入环形谐振腔而直接从直波导的另一端输出; 反向光传输为 CCW 模式且为谐振波长下, 因此大部分光耦合进入环形腔内产生谐振最终实现光隔离。测得该隔离器的在 1 550 nm 处具有 9 dB 的隔离度, 并且因为波导结构相对简单, 附加的波导损耗较低。

之后 BI L. 等人在此基础上进行了改进, 将环形谐振器改为跑道型环形谐振器, 如图 4 所示<sup>[9]</sup>。相比环形的方案, 跑道型谐振器的优点

在于增大了直波导与谐振腔波导的耦合长度, 让光更容易在谐振波长耦合进入谐振腔; 因此, 隔离度得到了提高, 在波长 1 550 nm 附近实现了 19.5 dB 的隔离效果。

2017 年, PINTUS P. 等人测出了环形谐振器结构的磁光隔离器的隔离性能: 在波长 1 558.35 nm 附近达到最大隔离度 32 dB, 插入损耗为 10 dB 左右, 顺时针和逆时针传播模式之间的带宽之差为 0.2 nm<sup>[10]</sup>。该器件采用同样直接键合的方法制成, 适用于横磁 (TM) 模。将制成的隔离器芯片输入、输出端口分别与可调谐激光器以及光功率计相接, TM 模的光利用带有透镜的保偏光纤接入芯片, 光斑大小为 2.5  $\mu\text{m}$ 。还测出了 MZI 结构的磁光隔离器的参数: 最大隔离度大于 10 dB, 插入损耗小于 4 dB, 工作带宽为 20 nm 左右。

对比 2 种结构的隔离器的性能可以发现, MZI 结构的隔离器的最大隔离度较低, 但是具有较大的工作带宽。2 种隔离器结构的插入损耗都较大 (插入损耗主要由 Ce:YIG 薄膜的吸收引起), 而且在环形谐振器结构中的吸收要更大一些, 因为这种结构键合的芯片尺寸要更长。额外损耗可以通过缩短被覆盖的直波导的长度, 或改变波导宽度以减少光学模式与 Ce:YIG 之间的重叠来减小。在应用方面, 由于环形谐振器结构的隔离器 2 种传播模式之间的带宽很窄, 因此可以应用于对单波长激光器的隔离中; MZI 结构的隔离器工作带宽较大, 更适用于波分复用系统和高速数字信号的传

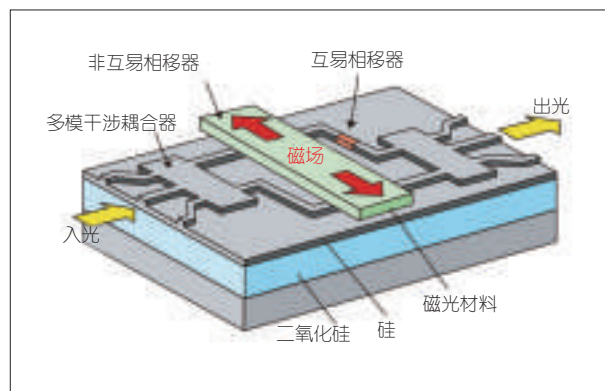


图2 键合磁光材料的马赫-曾德尔干涉仪型隔离器结构图

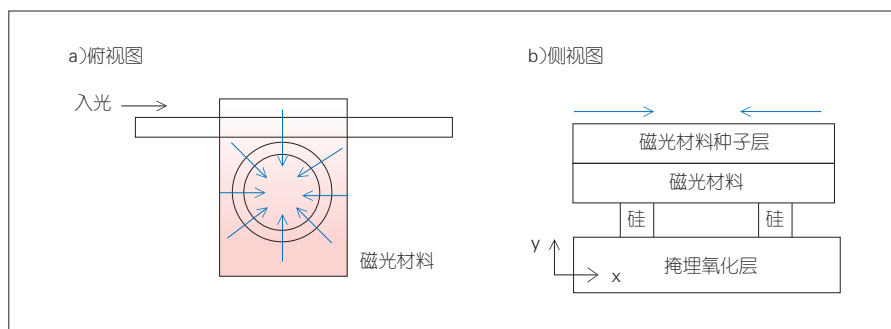


图3 键合磁光薄膜的环形谐振器型隔离器结构图

输系统中。

## 2.2 带有闭锁性磁光薄膜的法拉第旋光型光隔离器

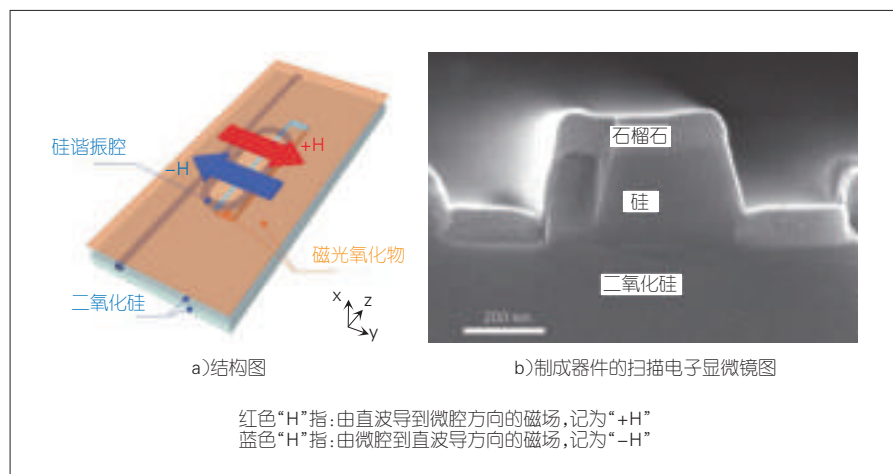
在以往关于片上集成的磁光隔离器研究工作中,人们大多在改进波导结构等方面做出努力,例如采用法拉第旋光器结构、MZI结构、环形谐振器结构等等;但是关于减小器件尺寸以及去除磁化元件(如永磁铁或电磁铁)的问题还没有得到广泛关注。DOLENDRA K. 等人采用晶体离子切片技术(如图5所示),制成了高隔离度、低插入损耗的集成磁光隔离器<sup>[11]</sup>。通过这种技术制成的3种厚度(300  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$

和11  $\mu\text{m}$ )的薄膜材料,测试出隔离度消光比均大于20 dB,插入损耗均小于0.1 dB。先利用LPE生长出高质量的块状材料,再利用基于离子注入的晶体离子切片技术,从高质量的块状材料中获得微米级厚度的磁光薄膜样品。这样制造磁光材料的好处在于成功避免了在光波导上进行晶格外延生长的需要。此外,能够将器件尺寸减小的重点在于这种磁光材料,不需要在器件内部放置磁体来产生磁场,即实现无磁体器件的制造。要达到这种效果,关键在于设计石榴石的组成成分。通过最大限度地引入铕(Eu)来实现没有偏置磁体的饱和磁性状态,以

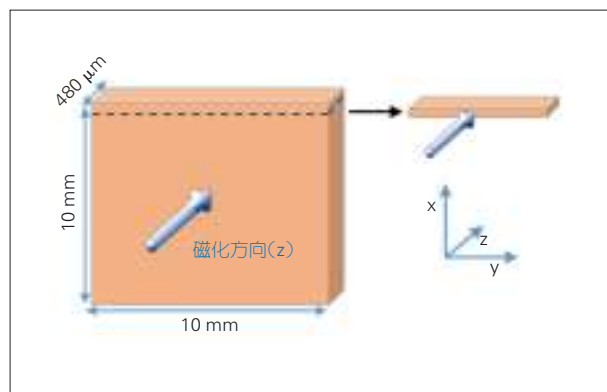
便在不产生补偿点的情况下减小石榴石的饱和磁化强度。制成的这种磁光材料被称为闭锁型法拉第旋光铁石榴石材料,材料内部存在预先锁住的磁化场;因此,在应用时不需要加偏磁磁铁,这样可以大大缩小器件的尺寸。

## 2.3 基于马赫-曾德尔行波调制器实现的光隔离器

2017年,SONG B. H. 等人在对一种商用的马赫-曾德尔调制器(MZM)加载射频(RF)调制信号时,调制器能够呈现出“时间门”的效果,即能够阻挡任何反向传输的光波,但同时允许正向传输的周期性脉冲信号通过,结构及原理图如图6所示<sup>[12]</sup>。这个特定的功能是利用光波、电信号的共同传播和逆向传播在调制器中光信号、电信号的相互作用。反向传播产生的调制器输出等于输入电信号的时间积分形式,积分窗口长度是调制器传播延迟的2倍。当输入电信号是周期性的RF频率并且积分窗口是其周期的整数倍时,积分结果是恒定的零,输入RF信号对于调制器反向传输光的输出没有影响。因此,当调制器偏置为零传输时,只要仔细选择调制频率,就可以阻挡与调制波相位无关的反向传输光波。正向传输光受RF驱动信号的常规调制。这样,正弦周期中的每个RF信号峰值驱动调制器远离零传输状态,并且打开了前向光波的传输时间门。



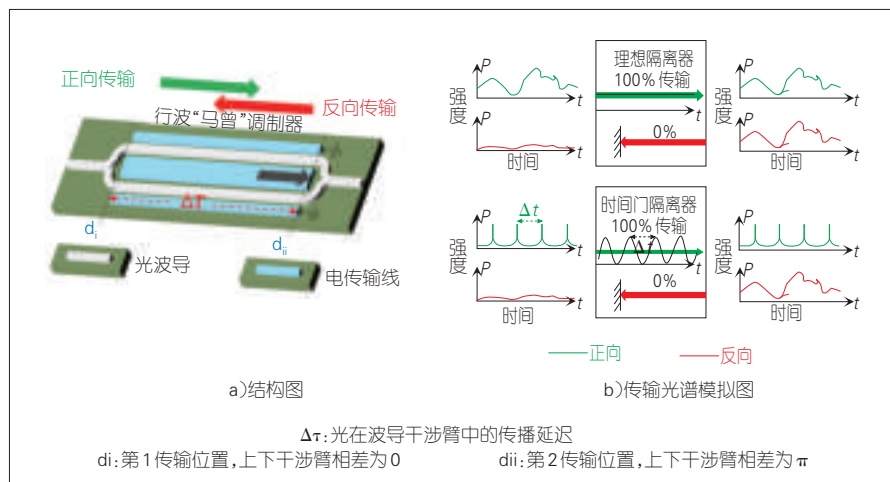
▲图4 环形跑道谐振器型隔离器



◀图5 闭锁性磁化薄膜及磁化方向示意图

## 2.4 实现光隔离的其他方法

除上述方法之外,人们还进行



▲图6 基于马赫-曾德尔行波调制器实现的光隔离器

了其他无磁方法的探索。例如,利用带有半畴结构的奇数个电畴的周期性极化铌酸锂晶体(O&HPPLN)构成一种新的非磁光隔离器<sup>[13]</sup>;利用二维光子晶体结构实现非线性光子晶体隔离器<sup>[14]</sup>;利用波导中的光子转化能够在相反的传播模式中产生非互易相位响应的特点,提出了一种MZI结构来构成光隔离器<sup>[15]</sup>;采用硅基集成的纳米光子环谐振器利用角动量诱导来实现非互易性传播<sup>[16]</sup>;利用四波混频(FWM)效应,采用具有级联滤波器的硅基集成光学隔离<sup>[17]</sup>等。这些方法都从非磁光材料的角度来实现光隔离,但普遍处于理论验证阶段。同时,方法中采用的光学调制、非线性效应等均需要较大功率的输入光,普遍存在结构复杂、正向光透过率低、损耗较大、实用性不强等弊端,但为实现集成光隔离的探索开辟了新的思路。

### 3 结束语

实现光隔离的基本方法是实现光在介质中的非互易性传输,可以

借助磁光方法和非磁光方法来完成。磁光方法主要依靠磁光材料介电常数的不对称性,通过法拉第旋光、非互易相移等具体方式来实现;而非磁光方法主要利用特殊的波导结构,改变介质折射率的分布或系统的非时变性来实现。总体来讲,磁光方法较为成熟并具有良好的隔离性能,但磁光材料和磁化元件的集成较为困难,损耗较高;非磁光方法虽然无需利用磁光材料,容易集成,但是隔离性能较差,大多数方法仍处于理论研究阶段。

对SOI波导器件的结构进行设计,产生了各类磁光以及非磁光隔离器件,且具有较高的集成度。磁光隔离器采用直接键合的方法将磁光薄膜材料贴合在SOI波导上;非磁光隔离器则利用光子跃迁、行波调制等方法。而马赫-曾德尔结构和环形谐振器结构的集成光隔离器在2种方法中均较为常见。2种结构相比,马赫-曾德尔结构具有较大的工作带宽,更适用于多波长传输;但结构相对复杂,不仅带来较高

的弯曲波导损耗,更要求工艺容差小,需要较高的工艺精度。微环结构隔离度较大,结构简单,损耗较低;但工作带宽窄,实用性偏低。其他方法如具有行波调制的方法,也为隔离器的发展提供了新的思路。随着工艺的不断进步,隔离器会逐渐突破结构和材料的限制,实现高隔离度、低插入损耗、大工作带宽、小尺寸、超紧凑的硅基光隔离器的集成。

### 参考文献

- [1] DILLON JR J F. Observation of Domains in the Ferrimagnetic Garnets by Transmitted Light[J]. Journal of Applied Physics, 1958, 29(9): 1286-1291. DOI: 10.1063/1.1723427
- [2] FRATELLO V J, WOLFE R. Epitaxial Garnet Films for Nonreciprocal Magneto-Optic Devices[J]. Handbook of Thin Films, 2000, 4: 93-141. DOI: 10.1016/B978-012265320-9/50095-7
- [3] GOA P E, HAUGLIN H, BAZILJEVICH M, et al. Real-Time Magneto-Optical Imaging of Vortices in Superconducting NbSe<sub>2</sub>[J]. Superconductor Science and Technology, 2001, 14(9): 729-731. DOI: 10.1088/0953-2048/14/9/320
- [4] AICHELE T, LORENZ A, HERGT R, et al. Garnet Layers Prepared by Liquid Phase Epitaxy for Microwave and Magneto-Optical Applications - a Review[J]. Crystal Research

- and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography, 2003, 38(7-8): 575-587. DOI: 10.1002/crat.200310071
- [5] GOMI M, SATOH K, ABE M. Giant Faraday Rotation of Ce-Substituted YIG Films Epitaxially Grown by RF Sputtering[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1988, 27(8A): L1536-L1538. DOI: 10.1143/jjap.27.L1536
- [6] 曾维友, 谢康, 蒋向东. 集成磁光隔离器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(10): 47-52
- [7] MIZUMOTO T, SHOJI Y. Optical Isolator for Silicon-on-Insulator Circuits[C]//2008 34th European Conference on Optical Communication. IEEE, 2008: 1-4. DOI: 10.1109/ECOC.2008.4729243
- [8] TIEN M C, MIZUMOTO T, PINTUS P, et al. Silicon Ring Isolators with Bonded Nonreciprocal Magneto-Optic Garnets[J]. Optics Express, 2011, 19(12): 11740-11745. DOI: 10.1364/OE.19.011740
- [9] BI L, HU J, JIANG P, et al. On-Chip Optical Isolation in Monolithically Integrated Non-Reciprocal Optical Resonators[J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 758-762. DOI: 10.1038/nphoton.2011.270
- [10] PINTUS P, HUANG D, SHOJI Y, et al. Heterogeneous Silicon Optical Isolators and Circulators[C]//Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics. Optical Society of America, 2017: ITh2A. 2. DOI: 10.1364/IPRSN.2017.ITh2A.2
- [11] KARKI D, STENGER V, POLLICK A, et al. Thin-Film Magnetless Faraday Rotators for Compact Heterogeneous Integrated Optical Isolators[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(23): 233101. DOI: 10.1063/1.4986237
- [12] SONG B, ZHUANG L, LOWERY A J. Travelling-Wave Mach-Zehnder Modulator as a Temporal Integrator and a Time-Gate Isolator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(13): 1101-1104. DOI: 10.1109/LPT.2017.2703299
- [13] LI J, SHI L, CHEN X. Optical Isolation Based on Faraday-Like Effect in Periodically Poled Lithium Niobate with Odd Number of Domains Tailed with a Semi-Domain[J]. JOSAB, 2014, 31(4): 730-734. DOI: 10.1364/josab.31.000730
- [14] CHEN C T, WANG G L, WANG X Y, et al. Deep-UV Nonlinear Optical Crystal KBe2BO3F2 - Discovery, Growth, Optical Properties and Applications[J]. Applied Physics B, 2009, 97(1): 9-25. DOI: 10.1007/s00340-009-3554-4
- [15] YU Z, FAN S. Optical Isolation Based on Nonreciprocal Phase Shift Induced by Interband Photonic Transitions[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(17): 171116. DOI: 10.1063/1.3127531
- [16] SOUNAS D L, ALÙ A. Angular-Momentum-Biased Nanorings to Realize Magnetic-Free Integrated Optical Isolation[J]. ACS Photonics, 2014, 1(3): 198-204. DOI: 10.1021/ph400058y
- [17] WANG K, WANG Y, GAO S, et al. Silicon Integrated Optical Isolator with Dynamic Non-Reciprocity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(15): 1261-1264. DOI: 10.1109/LPT.2017.2718110

## 作者简介



李明轩, 中国科学院半导体研究所读博士生; 主要研究方向为硅光集成。



于丽娟, 中国科学院半导体研究所副研究员; 主要研究方向为半导体光电子器件和光电混合集成技术; 已发表SCI论文30余篇。



刘建国, 中国科学院半导体研究所研究员, 中国科学院大学特聘教授、博士生导师, 军委科技委创新特区主题专家; 主要研究方向为高速光电子器件、光通信与微波光子技术; 曾获得国家杰出青年基金; 已发表SCI论文120余篇, 获得授权国家发明专利30余项。

# 中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

办刊宗旨:

以人为本,荟萃通信技术领域精英  
迎接挑战,把握世界通信技术动态  
立即行动,求解通信发展疑难课题  
励精图治,促进民族信息产业崛起

---

双月刊 1995年创刊 总第148期  
2019年10月 第25卷 第5期

主管:安徽出版集团有限责任公司  
主办:时代出版传媒股份有限公司  
深圳航天广宇工业有限公司  
出版:安徽科学技术出版社  
编辑、发行:中兴通讯技术杂志社

总编:王喜瑜  
副总编:蒋贤骏  
常务副总编:黄新明  
责任编辑:徐烨  
编辑:卢丹、朱莉、杨广西  
排版制作:查虹琴  
发行:王萍萍  
编务:王坤

---

《中兴通讯技术》编辑部  
地址:合肥市金寨路329号凯旋大厦1201室  
邮编:230061  
网址:tech.zte.com.cn  
投稿平台:tech.zte.com.cn/submission  
电子信箱:magazine@zte.com.cn  
电话:(0551)65533356

传真:(0551)65850139  
发行范围:公开发行  
印刷:合肥添彩包装有限公司  
出版日期:2019年10月25日  
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN  
定价:每册 20.00 元