



第三届全国期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊  
工信部优秀科技期刊 中国五大文献数据库收录期刊

ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN

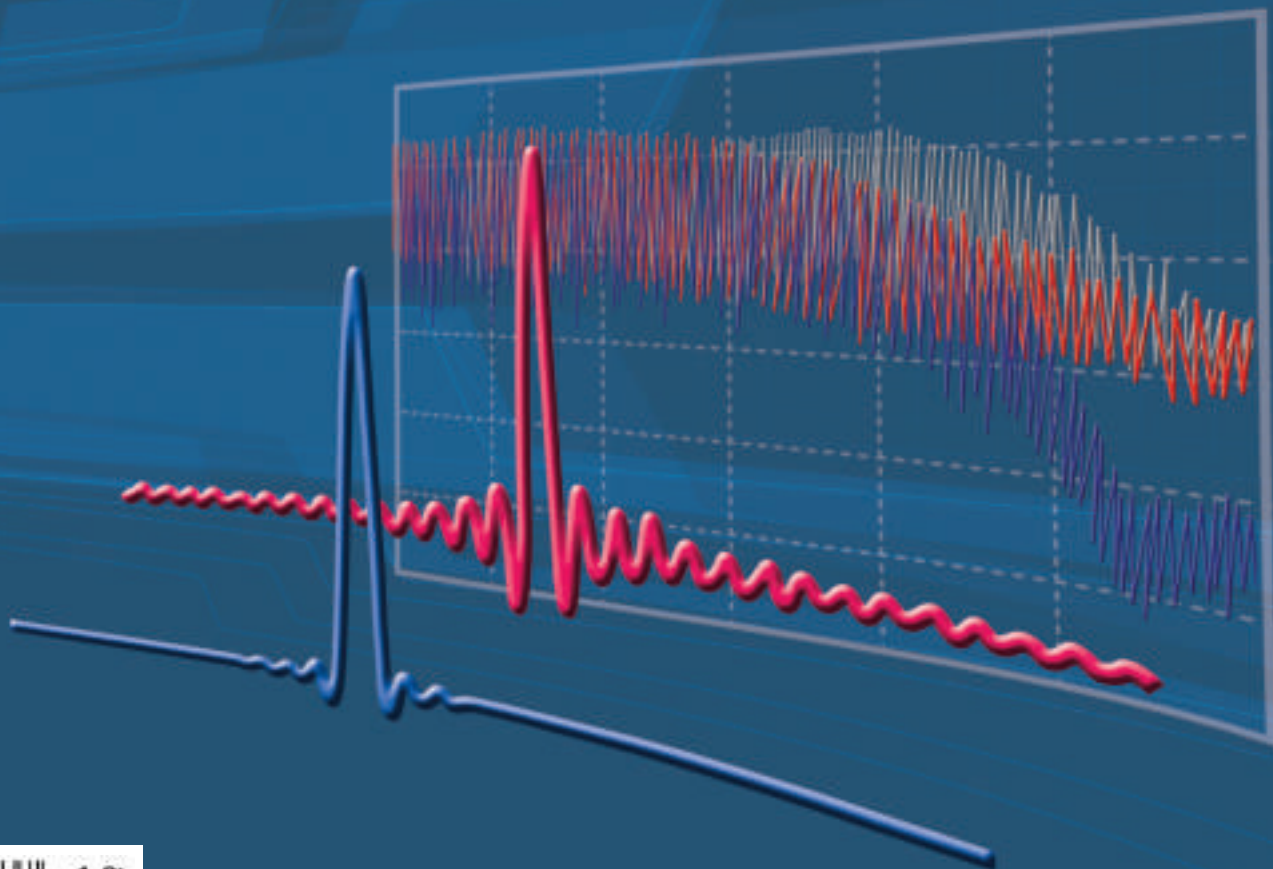
# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

[www.zte.com.cn/magazine](http://www.zte.com.cn/magazine)

2014年10月 • 第5期

**专题：下一代无源光网络技术与应用**



# 《中兴通讯技术》第6届编辑委员会委员名单

**主 任** 钟义信（北京邮电大学教授）

**副主任** 侯为贵（中兴通讯股份有限公司董事长） 糜正琨（南京邮电大学教授）

## 编委（按姓氏拼音排序）

- 艾 波** 中国联通学院党委书记,北京大学兼职教授,北京邮电大学兼职教授
- 曹淑敏** 工信部电信研究院院长、教授级高工
- 陈建平** 上海交通大学电子信息与电气工程学院电子工程系教授
- 陈 杰** 中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 陈前斌** 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长、教授
- 陈锡生** 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 程时端** 北京邮电大学网络技术研究院教授
- 高 文** 中国工程院院士,北京大学信息科学技术学院教授
- 葛建华** 西安电子科技大学通信工程学院副院长、教授
- 顾晓仪** 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授
- 郭云飞** 解放军信息工程大学副校长、教授
- 管海兵** 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长、教授
- 侯为贵** 中兴通讯股份有限公司董事长
- 何士友** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 洪 波** 中兴发展股份有限公司总裁
- 纪越峰** 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院执行院长、教授
- 江 华** 中兴通讯股份有限公司副总裁
- 蒋林涛** 工信部电信研究院科技委主任、教授级高工
- 雷震洲** 工信部电信研究院科技委副主任、教授级高工
- 李红滨** 北京大学科研部副部长,信息科学技术学院教授
- 李建东** 西安电子科技大学副校长、教授
- 李乐民** 中国工程院院士,电子科技大学通信与信息工程学院教授
- 李融林** 华南理工大学电子与信息学院教授
- 李少谦** 电子科技大学通信与信息工程学院院长、教授
- 李 星** 清华大学电子工程系教授,CERNET 网络中心副主任
- 马建国** 天津大学电子信息工程学院院长、教授
- 孟洛明** 北京邮电大学职称评审委员会主任,学术委员会副主任,网络与交换技术国家重点实验室主任、教授
- 糜正琨** 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 庞胜清** 中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 史立荣** 中兴通讯股份有限公司总裁
- 孙枕戈** 中兴通讯股份有限公司副总裁
- 孙知信** 南京邮电大学物联网学院院长、教授
- 谈振辉** 北京交通大学电子信息工程学院教授
- 唐雄燕** 中国联通网络技术研究院首席专家、教授级高工
- 田文果** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 童晓渝** 中电科软件信息服务有限公司董事、副总经理
- 王 京** 清华大学教授,清华大学信息科学与技术国家实验室副主任
- 王文东** 北京邮电大学软件学院党委书记兼副院长、教授
- 王晓明** 中兴通讯微电子研究院院长
- 王育民** 西安电子科技大学通信工程学院教授
- 韦乐平** 中国电信集团公司科技委主任、教授级高工
- 卫 国** 中国科学技术大学信息科学技术学院教授
- 邬贺铨** 中国工程院原副院长、院士
- 吴克利** 香港中文大学电子工程系教授
- 徐安士** 北京大学信息科学技术学院教授
- 须成忠** 美国韦恩州立大学电子与计算机工程系主任、教授,中科院深圳先进技术研究院首席科学家、云计算中心主任
- 续合元** 工信部电信研究院通信标准研究所总工、教授级高工
- 薛一波** 清华大学CPU&SOC 中心副主任,信息技术研究院研究员
- 杨义先** 北京邮电大学信息安全中心主任,灾备技术国家工程实验室主任、教授
- 杨 震** 南京邮电大学校长、教授
- 尤肖虎** 东南大学信息科学与工程学院院长、教授
- 乐光新** 北京邮电大学信息与通信工程学院教授
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网国家工程实验室主任、教授
- 张 平** 北京邮电大学网络技术研究院执行院长、教授
- 张同须** 中国移动通信集团设计院副院长兼总工
- 张智江** 中国联合网络通信有限公司网络建设部总经理、教授级高工
- 赵厚麟** 国际电信联盟(ITU)副秘书长、俄罗斯电信科学院院士
- 赵慧玲** 中国电信股份有限公司北京研究院总工程师、教授级高工
- 赵先明** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 郑纬民** 清华大学计算机系高性能计算研究所所长、教授,中国计算机学会理事长
- 钟义信** 北京邮电大学计算机学院教授
- 朱近康** 中国科技大学信息科学技术学院教授



# 目次

中兴通讯技术 总第118期 第20卷 第5期 2014年10月

## 专题：下一代无源光网络技术与应用

- 02 超密集波分复用无源网络技术 ..... 胡卫生, 郑宏军, 罗清龙  
06 正交频分复用无源光网络 ..... 何永琪, 林邦姜, 李巨浩  
09 光接入网络中的数字信号处理技术 ..... 余建军  
17 无源光网络的运行、维护与管理 ..... 沈成彬, 蒋铭, 王波  
23 下一代无源光网络节能关键技术 ..... 赵继军, 冯楠, 任丹萍  
29 环树型TWDM-PON动态资源调度方法研究 ..... 张治国, 胡新天, 陈雪  
34 下一代无源光网络的标准进展 ..... 程强, 苟书智  
38 软件定义光接入网 ..... 赵永利, 吴家林, 张杰

## 专家视点

- 42 软件定义光网络的机遇与挑战 ..... 纪越峰

## 运营应用

- 45 EV-DO网络承载小流量长在线业务的性能分析及优化 ..... 何晓明, 曹维华, 贺晓东

## 研究论文

- 50 软件定义数据中心网络研究 ..... 杨旭, 周烨, 李勇

## 开发园地

- 55 一种实现CSFB的方法研究 ..... 朱玉娜

## 系列讲座

- 58 无线体域网(2) ..... 陈文

## 综合信息

- 中国物联网产业年复合增长率超30% 空间巨大 (22) 中国光纤接入端口达1.35亿个 (54)  
中国联通主导发布首个网络即服务国际标准 (61) 2015年第1—3期专题征文 (62)

## 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。

期刊基本参数: CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*64\*zh\*P\*¥ 20.00\*15000\*13\*2014-10

# Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 20 No. 5 Oct. 2014

## Special Topic: Technology and Applications of Next-Generation Passive Optical Network

- 02 Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network ..... HU Weisheng, ZHENG Hongjun, LUO Qinglong
- 06 Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network ..... HE Yongqi, LIN Bangjiang, LI Juhao
- 09 Digital Signal Processing for Optical Access Networks ..... YU Jianjun
- 17 Operation, Administration and Maintenance of Passive Optical Networks ..... SHEN Chengbin, JIANG Ming, WANG Bo
- 23 Key Technologies of Power-Saving for Next-Generation Passive Optical Network ..... ZHAO Jijun, FENG Nan, REN Danping
- 29 Dynamic Resource Scheduling in Ring-Tree TWDM-PON ..... ZHANG Zhiguo, HU Xintian, CHEN Xue
- 34 Standardization of Next-Generation PON ..... CHENG Qiang, GOU Shuzhi
- 38 Software-Defined Optical Access Networks ..... ZHAO Yongli, WU Jialin, ZHANG Jie

## Expert View

- 42 Software-Defined Optical Networks: Opportunities and Challenges ..... JI Yuefeng

## Operational Application

- 45 Performance Analysis and Optimization of EV-DO Networks Supporting the Always-on Services of Little Traffic ..... HE Xiaoming, CAO Weihua, HE Xiaodong

## Research Paper

- 50 Software-Defined Data Center Networks ..... YANG Xu, ZHOU Ye, LI Yong

## Development Field

- 55 A Method for Implementing CSFB Solution ..... ZHU Yuna

## Lecture Series

- 58 Wireless Body Area Network (2) ..... CHEN Wen

## 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。

## 邮购须知

本刊常年办理邮购订阅业务, 欢迎订阅。订阅方法: 从邮局汇款至编辑部, 在汇款单上将订阅者的详细地址、收件人姓名及联系电话填写清楚, 并在汇款单附言栏注明所购杂志期次及数量。



## 专题：下一代无源光网络技术与应用

# 专 | 题 | 导 | 读

光接入网是国家信息网络基础设施的重要组成部分,是实现“宽带中国”战略目标的关键所在。光接入网的主流技术为无源光网络(PON),它的基本特征在于连接多用户端设备与局端设备光接口的光分配网(ODN)由“无源”的光缆和光分合路器件构成。由此使得PON具有高可靠性、低成本、与接入网业务形态匹配、便于集中控制、便于运维等优势,并成为光接入网的主流技术。目前,由IEEE规范建议的基于千兆以太网的EPON以及由ITU-T规范建议的GPON已大规模应用于中小企、事业用户和居民用户的宽带接入,10G EPON和XGPON(10G GPON)技术也已开始实际应用。随着以视频为代表的各种应用迅速普及,不仅用户带宽需求急剧增长,用户规模也日益扩大,GPON、10 GPON无源光网络必将向更大容量、更广覆盖范围、更低单位带宽成本、更便捷运维、更高能效的下一代无源光网络(NG-PON)演进。

PON的演进与发展所面临的主要挑战或者说亟待解决的关键问题主要体现在6点:(1)如何有效地扩大系统容量并使单位带宽总成本(包括建设成本和运维成本)下降?(2)如何合理构建关联业务运营管理或AAA服务器等多方的PON运行、维护与管理架构?如何提升PON运行维护管理效率?(3)如何既保证业务QoS又能有效降低NG-PON能耗?如何协同多种节能技术手段?(4)如何优化NG-PON网络结构以实现“广覆盖与扁平化”? (5)如何实现光接入网与城域网集中协同控制?如何动态自适应控制网络运行方式与调度网络资源以实现软件定义光接入网?(6)如何兼容已规模部署的ODN和EPON/GPON系统?

本专题旨在针对上述这些NG-PON所面临的关键问题,从运营商、设备制造商、研究机构和标准化组织多个方面,从技术、应用和标准化等多个角度,探讨技术发展趋势和可能的解决方案。例如,《超密集波分复用无源光网络技术》、《正交频分复用无源光网络》和《光接入网络中的数字信号处理技术》主要论述了大容量NG-PON的关键使能技术;《无源光网络的运行、维护与管理》主要阐述了PON网络的运行维护管理体系架构和智能光纤基础设施管理、终端零配置开通等关键技术;《下一代无源光网络(NG-PON)节能关键技术探讨》分析了各种PON节能方案并论述了基于网络编码的PON节能调度机制。每篇论文都凝聚了作者的才智与汗水,希望这些研究结果与观点认识能给读者有益的启示与参考。在此,对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢。

陈雪

2014年8月20日

## 本期专题策划人



陈雪

北京邮电大学教授、博士生导师,现任北京邮电大学学术委员会委员,信息光子学与光通信研究院学术委员会副主任;已主持和参与完成国家“973”计划课题、国家“863”计划课题、国家自然科学基金项目等国家级科研项目十余项;主要研究方向光接入网与高速大容量光纤传输技术;曾获国家技术发明二等奖1项,省部级科技进步奖8项;获得十余项国家发明专利授权,发表学术论文百余篇,出版著作与教材多部。

## 2014年第1—6期专题计划

1

社会网络技术、应用与市场

王玉峰 南京邮电大学通信与信息工程学院教授

2

第5代移动通信需求与技术探索

王京 清华大学信息技术研究院教授

3

网络以及功能虚拟化

虞红芳 电子科技大学通信与信息工程学院教授  
李乐民 电子科技大学通信与信息工程学院院士

4

智慧城市

祁庆中 上海信天通信有限公司总经理

5

下一代无源光网络技术与应用

陈雪 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授

6

可见光通信技术

陈建平 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教授

# 超密集波分复用无源光网络技术

## Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0002-004

**摘要:** 超密集波分复用光接入网(UDWDM-PON)方案可以在C波段密排1 000个下行波长和1 000个上行波长,支持1 000个用户。每个用户独立使用一对波长,可实现速率千兆并具有速率万兆的潜力。使用分光器兼容现有光分配网,采用数字相干通信技术,功率预算将可超过43 dB。UDWDM-PON在用户带宽保证、容量汇聚能力、网络覆盖范围等方面发展潜力明显。

**关键词:** 超密集波分复用;无源光网络;分光器;相干通信技术

**Abstract:** A typical ultra-dense wavelength division multiplexed passive optical network (UDWDM-PON) can accommodate 1 000 pairs of upstream and downstream wavelengths for 1 000 access users. Each user uses a pair of wavelengths independently with one gigabit bandwidth and potentially ten gigabits itself. The system uses the same optical splitters as the legacy optical distribution network. The power budget can be greater than 43 dB by using the digital coherent optical communication technique. The UDWDM-PON has potential advantages in terms of guaranteed user bandwidth, aggregated capacity, and coverage distance.

**Keywords:** ultra-dense wavelength division multiplexed; passive optical network; optical splitter; digital coherent communication

胡卫生/HU Weisheng<sup>1</sup>

郑宏军/ZHENG Hongjun<sup>2</sup>

罗清龙/LUO Qinglong<sup>2</sup>

(1. 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,上海 200240;

2. 聊城大学 山东省光通信科学与技术重点实验室,山东 聊城 252059)

(1. State Key Lab of Advanced Optical Communications Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

光进铜退开启了光纤接入的新时代,宽带接入迅速地提升至百兆水平并进入大规模部署阶段。

宽带是不断发展和与时俱进的<sup>[1]</sup>,谷歌已开始计划部署千兆宽带入户方案<sup>[2]</sup>,韩国等也将未来宽带目标设定在千兆入户。10年之后,用户接入带宽需求将达到千兆,保持与第5代移动通信(5G)并行发展的势头<sup>[3]</sup>。继下一代无源光网络第二阶段(NG-PON2)之后,有人提出研究NG-PON第三阶段计划,其目标即剑指千兆入户目标<sup>[4]</sup>。目前还缺少明确的NG-PON3演进的技术路线,或者说有几

种可能的技术思路。

### 1 接入网中的波分复用情况

相比于骨干网,光接入网使用的波段范围最宽(超过300 nm),波分复用(WDM)情况最为复杂。其原因在于:光接入网是一个局域网络,各局域网络的波长可以重用;而骨干网是广域网络,波长路由具有广域特征。光接入网一般不用光纤放大,放松了光波段的约束;而骨干网由于中继而使用与光纤放大器增益谱相吻合的光波段。光接入网传输距离20 km左右,放松了光收发器件的要求;而骨干网则使用长距离传输的光收发器件。光接入网的首要约束在于成本,放松了激光器的稳频要求,甚至于采用布里-珀罗腔低成本激光器;而骨

干网则使用密波分复用(DWDM)系统。光接入网是单纤双向系统,上下行需使用不同波长或波段;而骨干网是双纤双向系统。因此,在光接入网会出现各种不同的波分复用情况。

接入网中WDM情况可分为4种:

(1)宽波分复用(WWDM):波长间隔大于100~200 nm,常用于单纤双向传输的上下行。

(2)粗波分复用:典型波长间隔20 nm,采用低成本光器件(如无冷分布式反馈激光器),波长数量少。

(3)密集波分复用(DWDM):典型波长间隔0.8 nm,采用无色化光器件,如反射型半导体光放大器(RSOA)、反射型电吸收调制器(REAM)、可调谐激光器,波长数量16~64。

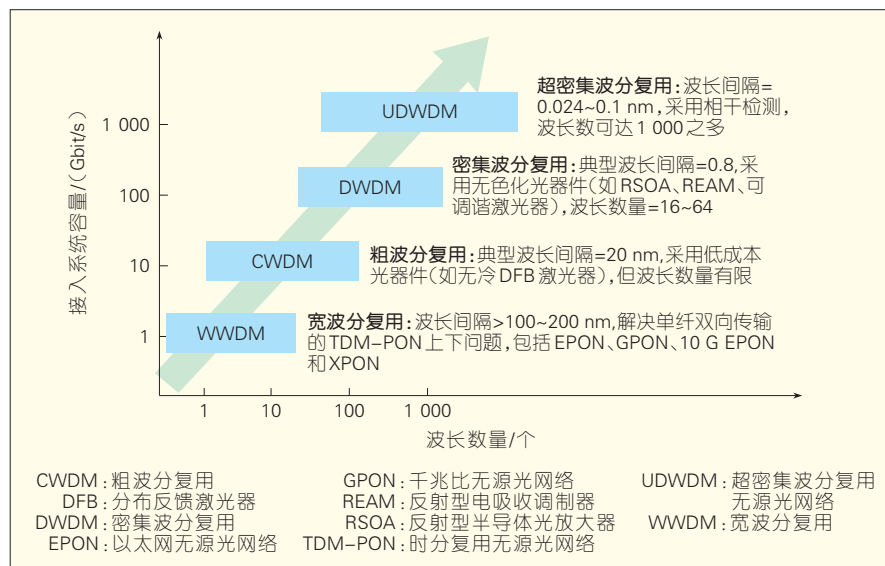
(4)超密集波分复用(UDWDM):波长间隔0.024~0.1 nm,采用相干检测,波长数可达1 000之多,后者是本文的中心内容。

光接入中的波分复用情况如图1所示。图1显示出超密集波分复用无源光网络方案(UDWDM-PON)是演

收稿日期:2014-07-24

网络出版时间:2014-08-21

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20110073130006)



▲图1 光接入中的波分复用情况

进的未来方向之一。

至此,有必要回顾一下业界对于光通信6个波段的划分,具体如表1所示。光通信的6个波段划分简述如下:

(1) O带(Original band 原始波段):波长范围1 260~1 360 nm,频率范围237.9~220.4 THz。

(2) E带(Extended band 扩展波段):波长范围1 360~1 460 nm,频率范围220.4~205.3 THz。

(3) S带(Short wavelength band 短波段):波长范围1 460~1 530 nm,频率范围205.3~195.9 THz。

(4) C带(Conventional band 常规波段):波长范围1 530~1 565 nm,频率范围195.9~191.6 THz。

(5) L带(Longer wavelength band 长波段):波长范围1 565~1 625 nm,频率范围191.6~184.5 THz。

(6) U带(Ultralong wavelength band 超长波长波段):波长范围1 625~1 675 nm,频率范围184.5~179.0 THz。

基于尽可能降低成本的考虑,早期以太网无源光网络(EPON)和千兆比无源光网络(GPON)定义的波长范围划分得都很宽松,分别是下行1 480~1 500 nm(1 490±10)和上行

1 260~1 360 nm(1 310±50),分处O波段和S波段,如同在道路上没有细划车道。当时还安排了模拟数字电视(CATV)的广播波长1 550 nm,兼顾模拟信道性能衰减快和需要光放大而处于光纤放大器增益窗口内。

2009年前后,考虑到EPON和GPON升级到10 GHz速率,兼顾到各种无源光网络(PON)共存,避免系统升级过程中对现有用户的业务造成影响,将EPON和GPON的波长收窄,即上行1 290~1 330 nm(1 310±20)。而万兆级XGPON采用上行1 260~1 280 nm,下行1 575~1 580 nm(标称波长1 577 nm)。

2013年前后,TWDM-PON被全业务接入网(FSAN)和ITU-T组织接纳为NG-PON2的标准方案,被视作为XGPON的堆叠,采用DWDM,上行暂时定为C波段短波长段(如1 528~

1 535 nm),上行暂时定为L波段长波长段(如1 596~1 604 nm)。

由此,接入网日益表现出多波长系统(MW-PON)的特征,具有多个光线路终端(OLT)和多个光网络单元(ONU)通信的机制,并同时保留了多个ONU共享一对波长的优势,其难点在于系统结构的设计、波长的分配和管理、ONU激活与迁移等方面。

## 2 超密集波分复用接入网

2010年前后FSAN发布了NG-PON2白皮书,当时业界提出了几种可能的候选方案:40G时分复用无源光网络(TDM-PON)、TWDM-PON、正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)、WDM-PON、UDWDM-PON等,综合考虑升级成本和兼容性之后,国际标准组织选择了TWDM-PON作为标准方案,其他方案不妨作为NG-PON3目标<sup>[5]</sup>,以下主要介绍UDWDM-PON。

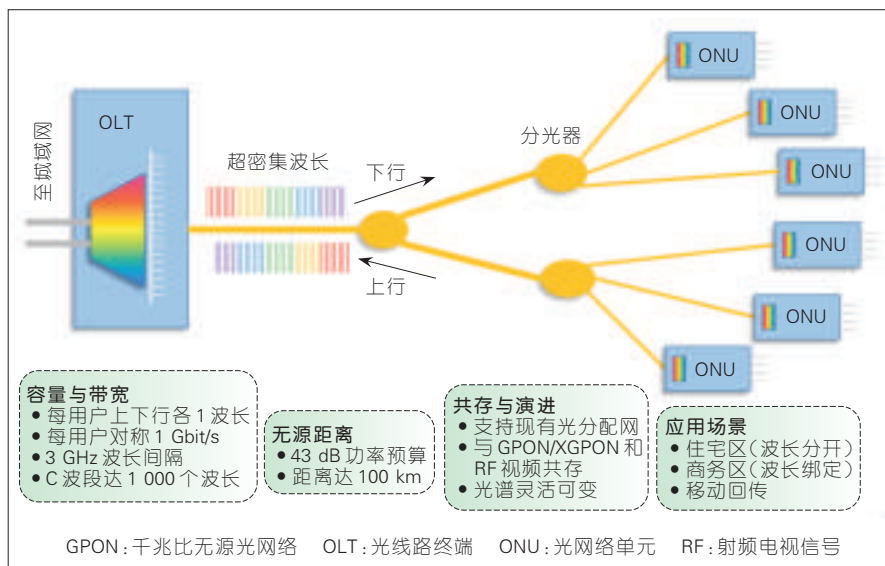
### 2.1 结构与特征

诺西网络(NSN)提出的UDWDM-PON方案最具有代表性,结构如图2所示<sup>[6-7]</sup>。C波段复用的波长数量高达1 000个,频率的间隔只有3 GHz,每用户上下行一对波长用对称带宽1 Gbit/s。采用相干检测,功率预算达43 dB,可以支持无源距离100 km。支持现有光分配网(分光器而不是阵列波导光栅)、与GPON/XGPON和射频电视信号共存,光谱灵活可变。可应用于住宅区(波长分开)、商务区(波长绑定)和移动

▼表1 光波段的划分及其波长与频率范围

频带	英文名称	中文名称	波长/nm	频率/THz
O带	Original band	原始波段	1 260~1 360	237.9~220.4
E带	Extended band	扩展波段	1 360~1 460	220.4~205.3
S带	Short wavelength band	短波长波段	1 460~1 530	205.3~195.9
C带	Conventional band	常规波段	1 530~1 565	195.9~191.6
L带	Longer wavelength band	长波长波段	1 565~1 625	191.6~184.5
U带	Ultralong wavelength band	超长波长波段	1 625~1 675	184.5~179.0





▲图2 UDWDM-PON的结构与特征

回传。

## 2.2 工作原理

由于波长间隔只有3 GHz,由此带来了两个问题,NSN提出了相应的解决方案<sup>[6-7]</sup>。其一,如何产生密集多波长信号? NSN科学家提出的独特方案是光传输组(OTG),如图3所示。工作原理:一个种子激光器经过边带调制产生10个间隔为3 GHz的激光输出,如果种子激光器的波长发生漂移,则该组10个激光输出同时发生漂移,保持3 GHz间隔不变。各相邻OTG之间留有一定的保护带,使得种子激光器的漂移不至于影响到相邻激光输出的交叠。该方案的好处是减少了激光器的数量,便于模块化扩展升级,符合接入网低成本要求。其二,一般解复用器或光滤波器很难满足超密集波长的分离,采用相干检测可以同时提取信号波长及其信号,但是,相干检测需要本振激光器,这会增加接入网成本。NSN科学家提出的独特方案是成对通道方法,如图3所示。工作原理:以下行为例,ONU为了提取信号波长及其信号,采用与该波长偏置1 GHz的上行激光器,它既作为本振激光,也作为上行光载波,一个激光器同时完成了

两个功能,降低了成本,符合接入网低成本的要求。

## 2.3 光电集成设想

UDWDM-PON在接入网中的可行性,取决于光子集成和电信号处理,如图4所示<sup>[7-11]</sup>。光子集成有助于降低成本和器件大小,电信号处理有助于消除传输和系统的信号损伤。

OLT侧的光子集成中,每一个种子激光器通过边带调制产生一套调制波长,数量 $n$ ,如果有 $m$ 个种子激光器,则可以提供 $m \times n$ 个通道,便于

模块化扩展。接收时,种子激光用于一组上行波长的本振。在数据速率1 Gbit/s和通道间隔1 GHz时,需要采用高阶调制方案,如差分正交相移键控(DQPSK),包括前向纠错码(FEC)开销,符号速率为633 MBaud。

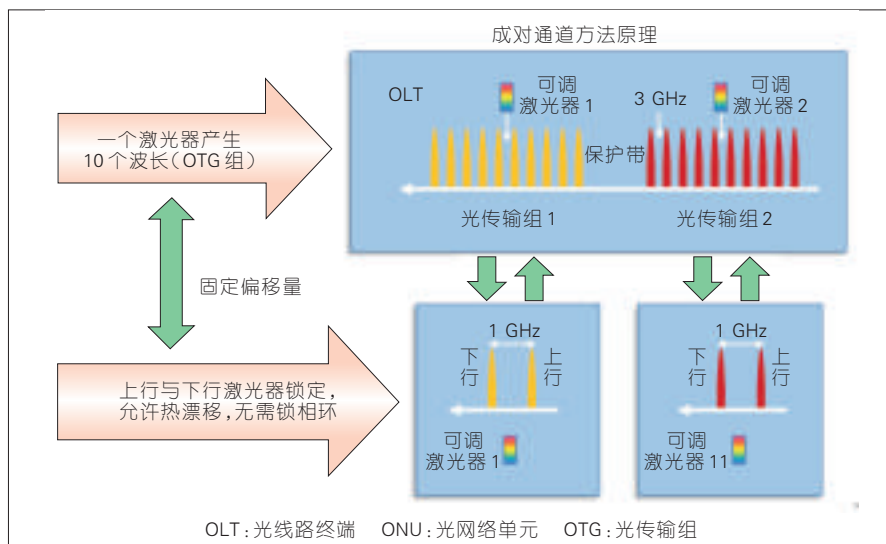
ONU侧的光子集成中,包括外腔可调谐激光器(ECL),它既作为上行发射,也作为本振。上行波长相对于下行波长偏置1 GHz。上行信号直接调制,而下行用它作为外差接收的本振,频率差1 GHz,不需要锁相环来稳定下行波长和本振波长,允许频偏 $\pm 50$  MHz,即信号和本振频率范围950~1 050 MHz,否则要重调本振,这有利于降低本振控制环路的要求。偏振分集接收和上行调制都集成进来。

## 2.4 传输损伤

传输损伤包括线性和非线性畸变<sup>[12-14]</sup>。

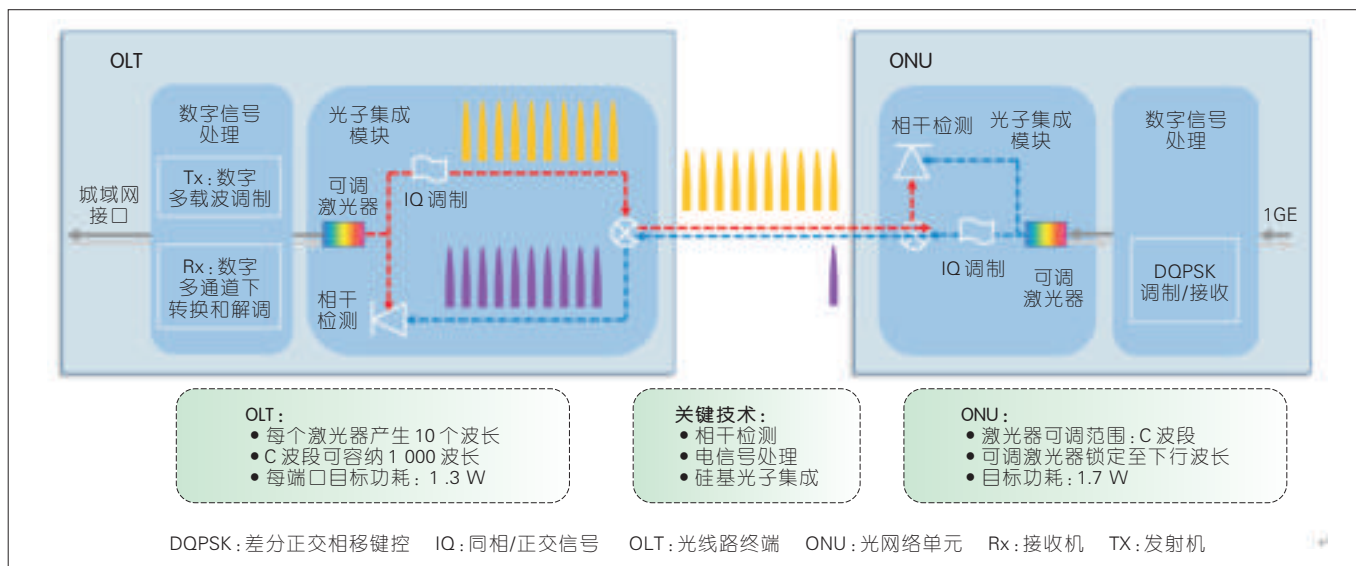
线性畸变如色散与偏振模色散,在633 MBaud和100 km光纤传输时并不严重,如果未来升级到5 GBaud或10 GBaud,线性畸变会严重起来,不过,相干检测和电信号处理可以消除该线性畸变。

非线性畸变如四波混频(FWM)等起主要作用。注意的是非线性畸



▲图3 成对通道方法原理





▲图4 光子集成与数字信号处理方案

变与功率有关,只有在 OLT 和第一个分光器之间全部都是上下行激光共纤传输情况下,非线性最为严重。而在第一个分光器之后至 ONU 之间,光纤中的激光功率不是最高的,非线性不甚严重。

### 2.5 兼容与升级

采用相干通信技术,功率预算超过 43 dB 或达到 48.6 dB<sup>[15]</sup>,使用分光器兼容现有光分配网,可以与 EPON、GPON 等共存。由于在 UDWDM-PON 中采用了 OTG 组的方法,可以通过增加 OTG 组的方法逐步增加带宽,从而使得 UDWDM-PON 在升级时更能体现“按需增长”的优势。因此,UDWDM-PON 在用户带宽保证、容量汇聚能力、网络覆盖范围等方面显示出优越性和发展潜力。

## 3 结束语

本文介绍了 UDWDM-PON 的方案、结构、原理、集成设想、升级方式等,从中可以看出,NSN 提出的 UDWDM-PON 可以在 C 波段密集排到 1 000 个下行波长和 1 000 个上行波长,支持 1 000 个用户,每个用户独立使用一对波长,速率千兆并具有每个用户接入带宽 10 Gbit/s 的潜力。使

用分光器兼容现有光分配网,采用相干通信技术功率预算超过 43 dB。因此,UDWDM-PON 在用户带宽保证、容量汇聚能力、网络覆盖范围等方面具有发展潜力。

### 参考文献

- [1] MILO M. Bandwidth, Optics and the age of Abundance [R]. OFC, 2012.
- [2] CEDRIC F L. The Road to Scalable 1 Gbit/s FTTH Access Networks [R]. ECOC, 2011.
- [3] ZTE. Driving the Convergence of the Physical and Digital Worlds [R]. ZTE, 2014.
- [4] SHUNJI K. An Operator's View: Technologies for NG-PON2: Why I think this technology is the clear winner [R]. OFC, 2012.
- [5] SHUNJI K. An operator's View Technologies for NG-PON2 [R]. OFC, 2012.
- [6] SYLVIA S. Demonstration of a Coherent UDWDM-PON with Real-Time Processing [R]. OFC, 2011.
- [7] JUN S W. UDWDM PON—the Clear Technology Winner for NG-PON2 [R]. NFOEC, 2012.
- [8] GOTTFWALD E. Method and device for adjusting a tunable laser of an optical network element [R]. IPA, 2012.
- [9] GOTTFWALD E. Mode-hop prevention in a tunable laser of an optical network element [R]. IPA, 2012.
- [10] GOTTFWALD E. Coherent optical system comprising a tunable local oscillator [R]. IPA, 2012.
- [11] JACKLYN D R. Analysis of Nonlinearities on Coherent Ultradense WDM-PONs Using Volterra Series [J]. Journal of lightwave technology, 2012,30(2):234–239.
- [12] ANDRE S. Impact and Compensation Techniques of Laser Phase Noise in Ultra-Dense Coherent Access Networks [R]. ICTON, 2013.
- [13] DOMANIC L. Digital Coherent Receivers for

Long-Reach Optical Access Networks [J]. Journal of lightwave technology, 2013,31(4): 609–617.

[14] MARCO P. All DFB-Based Coherent UDWDM PON With 6.25 GHz Spacing and a >40 dB Power Budget [J]. IEEE photonics technology letters, 2014,26(2):107–122.

[15] DOMANIC L. A long-reach ultra-dense 10 Gbit/s WDM-PON using a digital coherent receiver [J]. Optics Express, 2010,18(25): 25855–25860.

### 作者简介



**胡卫生**,上海交通大学特聘教授、博士生导师;主要研究领域为新型光交换与宽带光接入;已主持和参与科研项目 30 余项;已发表论文 200 余篇,其中被 SCI 检索 100 余篇。



**郑宏军**,华中科技大学博士毕业;北京交通大学博士后,美国中佛罗里达大学访问学者,聊城大学物理科学与信息工程学院副教授、研究生导师;主要研究领域为微光子学与光接入网。



**罗清龙**,北方工业大学硕士毕业;聊城大学物理科学与信息工程学院讲师;主要研究领域为光通信与编码技术;参加翻译了《光通信中的 OFDM》和《光信道编码》等著作。

# 正交频分复用无源光网络

## Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0006-03

**摘要:** 认为当采用低频段的射频资源时,色散导致的双边带功率衰落对正交频分复用无源光网络(OFDM-PON)的影响很小。基于时分复用(TDM)架构的OFDM-PON,充分利用正交频分复用(OFDM)技术的优势与TDM架构的无色性,与现有的以太网无源光网络(EPON)、千兆比无源光网络(GPON)兼容性高,是解决上行无色性传输的最优方案。基于OFDM的时波分复用无源光网络(TWDM-PON)充分利用了OFDM调制优势,用来提升单载波容量,在不改变TWDM-PON系统结构情况下,实现100 Gbit/s的高速接入,是未来无源光网络的重要候选方案。

**关键词:** 正交频分复用;无源光网络;时分复用;时波分复用

**Abstract:** In this paper, we propose that the power fading of double sideband for OFDM-PON induced by chromatic dispersion is small when using low radio frequency (RF). The OFDM-PON based on time division multiplexing (TDM) architecture is the best solution for uplink colorless transmission. This makes full use of the advantages of OFDM technique and colorless TDM architecture and is highly compatible with existing EPON and GPON. Time wavelength division multiplexing (TWDM) PON based on OFDM is a strong candidate for future PON, which makes full use of OFDM modulation to increase the capacity of a single carrier without changing the structure of TWDM-PON system, achieving 100 Gbit/s high-speed access.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing; passive optical network; time division multiplexing; time wavelength division multiplexing

何永琪/HE Yongqi  
林邦姜/LIN Bangjiang  
李巨浩/LI Juhao

(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 Network, Peking  
University, Beijing 100871, China)

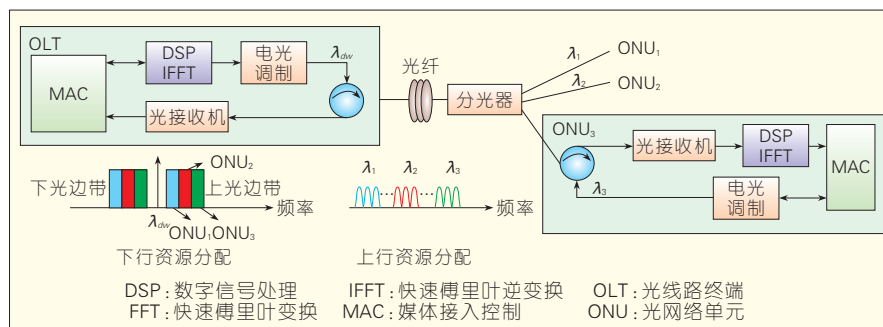
用户端,光信号由光接收机实现光电转化,电正交频分复用(OFDM)信号由DSP芯片实现解调。下行信号的带宽被诸多正交的子载波划分。每一个光网络单元(ONU)分配到一个子信道,包括一个或多个子载波。在上行传输中,每一个用户的数据被调制到特定的子载波上,其他的子载波上不调制数据,生成的电OFDM信号被调制到不同的波长上。所有上传的信号由分光器合束,再经光纤传输到中心局。在光线路终端(OLT)端,一个光接收机实现所有用户信号的接收。由于子载波之间的正交性,不同用户之间的信号不存在串扰。OFDMA-PON的主要优势为:

(1) 子载波的频谱部分相互交叠,结合高阶调制格式,易于实现高

随着云计算、高清视频、在线游戏等新互联网业务的爆炸性增长,无源光网络亟需升级以支持更高的数据速率。基于正交频分复用多址(OFDMA)的无源光网络(PON)技术自2007年以来受到了众多研究机构的关注<sup>[1]</sup>。OFDMA-PON的基本原理如图1所示。在下行传输中,

OFDM信号由数字信号处理(DSP)芯片生成,通过光强度调制器调制到 $\lambda_{div}$ 上,调制生成的光双边带信号经过光纤传输,广播给所有的用户。在

收稿日期: 2014-07-11  
网络出版时间: 2014-08-21  
基金项目: 国家重点基础研究发展  
("973")规划(2010CB328201、  
2010CB328202); 国家高技术研究发展  
("863")计划(2011AA01A106); 国家自然  
科学基金(61377072、61275071)



▲ 图1 OFDMA-PON的基本原理

频谱效率。

(2) 发射端与接收端的数字信号处理方法可以消除各种线性损伤,如光纤中的色散与偏振模色散。

(3) 每一个子载波可视为一个透明的输送管道,用以传送任意的网络数据。根据网络需求,子载波可以被动态地分配给不同的网络服务。

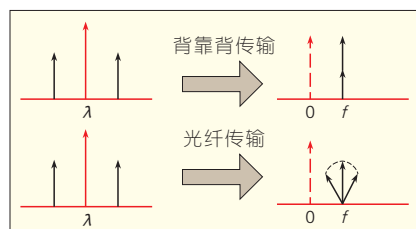
此外,这种正交多址的复用方式可以与时分多址结合在时域与频域实现动态带宽分配。

尽管 OFDMA-PON 有着如此多的技术优势,但也存在着不少技术难题,下面对相关技术进行分析。

## 1 色散引起光双边带信号功率衰落

色散对光双边带传输的影响如图 2 所示。电 OFDM 信号经过强度调制生成一个光双边带信号,包括一个光载波与两个信号边带。两个信号边带上的数据信息是相同的。在背靠背传输中,光接收机接收到的射频信号是两个信号边带功率的叠加,不存在功率衰落。与单边带传输相比,双边带传输有 3 dB 的功率增益。由于光纤色散的影响,两个边带经过光纤传输后,有着不同的相位延迟。接收机接收到的射频信号是两个边带信号的矢量叠加。与背靠背传输相比,射频信号功率变小。当两个边带的相位差为 180 度时,接收到的电信号功率甚至为 0。光纤传输后,接收到的射频信号的功率,可由公式(1)给出:

$$P \propto \cos \left\{ \frac{\pi L D \lambda c^2 f^2}{c \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \arctan(\alpha_{Mz}) \right]} \right\} \quad (1)$$



▲ 图 2 色散对光双边带传输的影响

其中  $L$  为光纤的长度,  $D$  为光纤色散系数,  $f$  为射频信号的频率,  $\lambda c$  为光载波波长,  $\alpha Mz$  为调制器的啁啾系数<sup>[2]</sup>。单边带传输可以避免这种功率损伤,但是会增加发射机的复杂度<sup>[3-4]</sup>。通过仿真分析,笔者认为对于 20 ~ 100 km 的接入系统,采用低频段的射频资源(0 ~ 10 GHz),色散引起的双边带功率损伤很小。结合高阶调制格式,我们在 26.7 km 与 100 km 标准单模光纤上成功实现了 20 Gbit/s 双边带 OFDM-PON<sup>[5]</sup>。

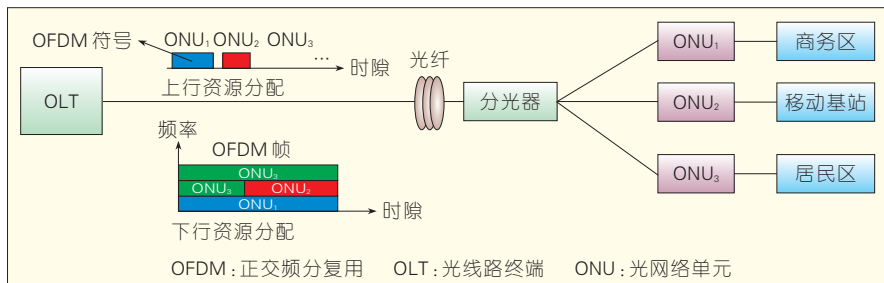
## 2 无色上行传输

当采用正交频分多址接入,上行相近的波长会在光接收机中相互拍频,拍频产生的接收光信号极其不稳定。因此,ONU 在上行传输时需要不同的波长来避免拍频噪声。这大大增加了系统成本与波长管理维护的难度。当前实现无色上行传输的方法主要有:可调谐光源;波长重用;反射性调制器,如反射半导体光放大器(RSOA)<sup>[6-8]</sup>。可调谐光源复杂度大,成本高,不适合接入系统。在波长重用方案中,上行波长经过两次链路传输,使得上行传输的功率预算不足。而 RSOA 器件带宽较小,较难产生性能良好的 OFDM 信号。总的来说,这些解决方案都不太成熟,在成本或传输性能上存在不足。为了解决该无色传输难题,笔者提出了 TDM-OFDM-PON 的系统架构<sup>[9]</sup>,如图 3 所示。其下行传输可采用正交频分多址的接入方式,亦可采用频分与时分相结合的混合接入方式,而上行传输则采用时分多址的方式对带宽资源

进行分配。TDM-OFDM-PON 充分利用 OFDM 技术优势与 TDM 架构的无色性,与现有的 EPON、GPON 兼容性高。就当前来看,基于 TDM 架构的 OFDM-PON 是解决上行无色性传输的最优方案。

## 3 面向 40 Gbit/s 与 100 Gbit/s 的高速传输

高速 OFDM 信号的产生严重依赖于 DSP 器件,特别是数模(DAC)、模数转换(ADC)芯片。目前,DAC、ADC 芯片在速度与精度上都受限,较难实现高速率的转换;此外,高速 DSP 芯片比较昂贵,ONU 的成本较难控制。为了降低 DSP 芯片的带宽需求,NEC(美国)实验室提出了一种偏振复用的解决方案。该方案结合多输入多输出(MIMO)算法,可以实现 40 Gbit/s 的偏振复用 OFDM-PON<sup>[10]</sup>。笔者也提出了一种偏振交织的解决方案<sup>[11]</sup>,该方案是偏振复用的改良方案。相较于偏振复用,偏振交织有着较低的系统复杂度。结合多波带技术,这两种方案均可实现 100 Gbit/s 的 OFDM-PON<sup>[12-13]</sup>。然而,偏振复用与偏振交织的 OFDM-PON 系统的复杂度较高,需要一定的偏振控制技术,不具有成本优势。富士通公司采用 65 GS/s 的高速非商用 DAC 与 ADC 成功实现了 100 Gbit/s 的 OFDM 接入系统<sup>[14]</sup>。这种高速的 DAC 与 ADC 成本较高,短期内得不到商用。在 2012 年 4 月的全业务接入论坛(FSAN)会议上,综合考虑技术成熟度、成本、复杂度,时分复用无源光网络(TWDM-PON)成为了 NG-PON2 的主



▲ 图 3 基于 TDM 架构的 OFDM-PON



流候选方案<sup>[15]</sup>。TWDM-PON采用4个XG-PON以WDM方式混合来实现40 Gbit/s下行速率和10 Gbit/s上行速率。ONU端的滤波器用以选择下行波长,而激光器可调谐到任意上行波长上。那么OFDM技术在未来的接入系统中是否会被弃用?笔者认为,随着集成技术与DSP技术的发展,基于DSP的调制在未来的100 Gbit/s以上速率的接入系统中会扮演一个十分重要的角色。基于开关键控(OOK)调制的TWDM-PON系统,由于光纤色散的影响,其单载波容量很难升级。因此,只能使用多载波技术来升级系统的容量(堆叠更多的XG-PON),这对ONU端的发射机与接收机的调谐性提出了更高的要求。OFDM作为一种优秀的调制格式,可以很好提升单载波传输容量。文献[16]给出了基于OFDM的4×25 Gbit/s TWDM-PON。在该结构中,每一时隙传输的是OFDM符号,而不是OOK信号。结合高阶调制,单载波的速率很容易达到25 Gbit/s。在下行传输中,4个25Gbit/s OFDM的信号,经WDM复用器合束,再经光放大,广播给所有用户。用户首先对波长进行选择,再选择相应的时隙。在上行传输中,用户在相应的时隙发送OFDM符号,可调谐激光器调谐到相应的上行波长上。在OLT端,上行信号经过光放大,由WDM解复用器分开4个上行波长,分别进行数据解调。基于OFDM的TWDM-PON充分利用了OFDM技术优势,提升单载波容量,在不改变TWDM-PON系统结构下,实现100 Gbit/s的高速接入,是未来无源光网络的有力候选方案。

#### 4 结束语

在新型互联网业务的驱动下,未来的无源光网将面向更高速率更高容量。随着集成技术与数字信号处理技术的发展,OFDM技术在未来的接入系统中会扮演一个十分重要的角色。正交频分多址的接入方式,很

难实现低成本的无色上行传输。OFDM作为一种优秀的调制方法,结合成熟的TDM技术以及多载波技术,是未来100 Gbit/s以上速率无源光网络的有力候选方案。

#### 参考文献

- [1] QIAN D Y, HU J Q, YU J J. Experimental Demonstration of a Novel OFDM-A Based 10Gbit/s PON Architecture [C]//Proceedings of the 2007 European Conference on Optical Communications (ECOC), Oct 6-7, 2007, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2007: 5.
- [2] SMITH G H, NOVAK D, AHMED Z. Overcoming chromatic dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1997,45(8): 1410-1415.
- [3] CHOW C W, YEH C H, LO S M G, LI C, TSANG H K. Longreach radio-over-fiber signal distribution using single-sideband signal generated by a silicon-modulator [J]. Opt. Express, 2011,19(12): 11312-11317.
- [4] WANG C H, CHOW C W, YEH C H, WU C L, CHI S, LIN C. Rayleigh noise mitigation using single sideband modulation generated by a dual-parallel MZM for carrier distributed PON [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010,22(11): 820-829.
- [5] LIN B J, LI J H, YANG H, WAN Y S, HE Y Q, CHEN Z Y. Comparison of DSB and SSB transmission for OFDM-PON [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2012,4(2): 94-100.
- [6] QIAN D, CVIJETIC N, HU J, WANG T. A novel OFDMA-PON architecture with source-free ONUs for next-generation optical access networks [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009,21(17):1-5.
- [7] LEE J H, LEE K, LEE S B, KIM C H. Extended-reach WDM-PON based on CW supercontinuum light source for colorless FP-LD based OLT and RSOA-based ONUs [J]. Opt. Fiber Technol., 2009,15(3): 310-319.
- [8] CHOW C W, YEH C H, WANG C H, SHIH F Y, CHI S. Rayleigh backscattering performance of OFDM-QAM in carrier distributed passive optical networks [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2008,20(22): 1848-1850.
- [9] YANG H, LI J H, LIN B J, WAN Y S, GUO Y, ZHU L X, LI L, HE Y Q, CHEN Z Y. DSP-Based Evolution From Conventional TDM-PON to TDM-OFDM-PON [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,31(5): 2735-2741.
- [10] QIAN D, CVIJETIC N, HU J, WANG T. 40-Gbit/s MIMO-OFDM-PON Using Polarization Multiplexing and Direct-Detection [C]//Proceedings of the 2009 Opt. Fiber Commun. (OFC), Oct 9-11, 2009, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2009: 3.
- [11] LIN B J, LI J H, HUI Y, JIANG S, ZHU L X, HE Y Q, CHEN Z Y. Experimental demonstration of optical MIMO transmission for SCFDM-PON based on polarization interleaving and direct detection

[J]. Optics Communications, 2012,285(6): 5163-5168.

- [12] LIN B J, LI J H, HUI Y, WAN Y S, LUO Y B, ZHANG P, HE Y Q, CHEN Z Y. 100-Gbit/s Multi-band OFDM-PON Based on Polarization Interleaving and Direct Detection [C]//Proceedings of the ACP 2012, Oct 6-7, 2012, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2012:5.
- [13] QIAN D, CVIJETIC N, HU J, WANG T. 108 Gbit/s OFDMA-PON with polarization multiplexing and direct detection [J]. Light Technol., 2010,28(4): 484-493.
- [14] TAKAHARA T, TANAKA T, NISHIHARA M, KAI Y, LI L, TAO Z N, RASMUSSEN J C. Discrete Multi-Tone for 100 Gbit/s Optical Access Networks [C]//Proceedings of the OFC 2014, Oct 6-7, 2014, Calgary, Canada. New York, NY, USA:ACM, 2014:1.
- [15] LUO Y Q, ZHOU X P, EFFENBERGER F, YAN X J, PENG G K, QIAN Y B, MA Y R. Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,31(4): 484-493.
- [16] LUO Y B, LIN B J, HUI Y, LI J H, HE Y Q, CHEN Z Y, LI Z B. Symmetric 100-Gbit/s TWDM-PON with DSB OFDM Modulation [C]//Proceedings of the OFC 2014, Oct 6-7, 2014, Calgary, Canada. New York, NY, USA: ACM, 2014:61.

#### 作者简介



何永琪,北京大学信息科学技术学院教授、博士,北京邮电大学和北京交通大学兼职教授,中国通信学会第二届通信软件技术委员会委员,北京市科学技术奖专业评审委员会专家,国家科技型中小企业创新基金评审专家,国家重点新产品计划评审专家;长期从事光通信研究与产品开发,目前主要从事高速光传输系统与光网络等方面的研究;已主持基金项目10余项,发表论文70余篇。



林邦强,北京大学信息科学技术学院在读博士生;从事无源光接入网络的研究;已参与基金项目3项;已发表论文20余篇。



李巨浩,北京大学信息科学技术学院电子学系副教授、工信部《现代传输》杂志编委、国际学术会议 ACP 2014 组委会成员;从事基于相干检测和新型调制技术的光传输系统和网络的基础理论和应用研究,研究重点包括基于单载波频域均衡的高速光传输技术、下一代多维度无源光接入网络、光超级信道的全光处理技术等;已发表论文80余篇。



# 光接入网络中的数字信号处理技术

## Digital Signal Processing for Optical Access Networks

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0009-008

**摘要:** 采用先进的数字信号处理(DSP)技术,在发射机和接收机分别引入预处理和后处理,以提高光接入网络的频谱效率并延长传输距离。研究了一种基于光超奈奎斯特(Super-Nyquist)滤波的类9状态正交振幅调制(9QAM)信号多模均衡(MMEQ)后端DSP算法,使用这种方案,能够有效提高频谱效率,实现了频谱效率高达4 bps/Hz的正交移相键控(QPSK)信号传输;还研究了一种基于数字Super-Nyquist信号前端预处理的方案,此方案的优点是不需要光预滤波即可达到相同的频谱效率。使用一个采用直接调制激光器(DML)、直接探测和数字均衡技术的高速无载波幅度相位-64状态正交振幅调制(CAP-64QAM)系统,在20 km标准单模光纤(SSMF)上实现了创纪录的60 Gbit/s CAP-64QAM信号传输;使用相干探测,实现了速率高达100 Gbit/s的64状态正交振幅调制-正交频分复用(16QAM-OFDM)实时传输系统,解决了实时OFDM信号处理中的关键问题。

**关键词:** 数字信号处理; 高频谱效率; 超奈奎斯特; 相干光传输

**Abstract:** In this paper, we investigate advanced digital signal processing (DSP) at the transmitter or receiver side for signal pre-equalization and post-equalization in order to improve the spectrum efficiency (SE) and transmission distance in an optical access network. A novel DSP scheme for this optical super-Nyquist filtering 9 QAM like signals based on multi-modulus equalization without post filter are proposed and experimentally demonstrated, which directly recovers the Nyquist filtered QPSK to a 9-QAM-like signal. With this technique, SE can be increased to 4 bits/s/Hz for QPSK signals. A novel digital super-Nyquist signal generation scheme is also proposed to further suppress the Nyquist signal bandwidth and reduce channel crosstalk without using optical pre-filtering. Only optical couplers are needed for super-Nyquist WDM multiplexing. We extend the DSP for short-haul optical transmission networks by using high-order QAMs. We propose and experimentally demonstrate a high-speed CAP-64 QAM system using direct modulation laser based on direct detection and digital equalization. Decision-directed least mean square is used to equalize the CAP-64QAM. Using this scheme, we generate and transmit up to 60 Gbit/s CAP-64QAM over 20 km stand single-mode fiber based on the DML and direct detection. Finally, several key problems are solved for real time OFDM signal transmission and processing. Using coherent detection, up to 100 Gbit/s 16 QAM-OFDM real-time transmission is realized.

**Keywords:** digital signal processing; high spectrum efficiency; super-Nyquist; coherent optical transmission

余建军/YU Jianjun  
(中兴通讯 北美光波研究所, 美国 新泽西 07960)  
(Optics Labs, ZTE (TX) Inc, NJ 07960, USA)

速率为100 Gbit/s的长距离系统为例,将单载波偏振复用的正交相位键控(PDM-QPSK)调制格式与相干探测的数字信号处理技术(DSP)相结合,已经被证明是一种成功的解决方案。另一方面,能够提供高频谱效率传输的技术也被广泛研究,并可归结为两个主要方向,即降低频谱带宽需求以及增加调制阶数。前者采用光域或电域滤波的频谱整形技术,也被称为奈奎斯特(Nyquist)或超奈奎斯特(Super-Nyquist)技术;后者采用多阶调制格式,如32状态正交振幅调制(32-QAM)、64状态正交振幅调制(64-QAM),甚至更高阶的正交振幅调制(QAM)<sup>[1-26]</sup>。由于受到各种因素限制,这两类技术都依赖于发射机或接收机的先进数字信号处理,主要的限制因素包括对激光器频偏的高敏感度、相位噪声、符号间干扰(ISI)以及各种信道内和信道间损伤。

采用高阶调制格式是实现高频谱效率的最简单方案,但这种方案具有高损伤代价、高接收机灵敏度要求、覆盖距离变短等问题。16-QAM信号需求的光信噪比(OSNR)比正交相位键控(QPSK)高了6 dB,并会随着星座点的增加呈指数增长。对于光纤传输,光纤的非线性限制了入纤功率,从根本上限制了OSNR。另一

在长距离骨干网及短距离接入网中,随着云计算、社交媒体和移

动数据业务的迅速发展,因特网和个人业务的带宽需求以每年30%到60%的速度持续增长。业务带宽的增长趋势与降低单位比特成本的需求相结合,更加突显了高速光传输接口和高频谱效率技术的重要性。以

收稿日期: 2014-07-10

网络出版时间: 2014-08-21

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA011303、2013AA010501); 国家自然科学基金(61325002)

方面,高频谱效率调制格式的星座点欧氏距离更小,对光纤非线性的容忍度更低。在最新的实验<sup>[27]</sup>中,位于 $\text{BER}=10^{-3}$ 处的 $\text{OSNR}$ 代价达到8 dB,而QPSK实现只有1 dB左右。因此,针对高阶QAM格式的先进DSP算法研究十分重要。与QPSK不同,高阶QAM信号的偏振解复用、频偏和相位恢复都需要新的处理方案。在场地实验中,速率为512 Gbit/s的双载波16-QAM信号在色散补偿光纤中传输了734 km的极限距离,并在200 GHz频带间隔中传输10 Gbit/s信号<sup>[28]</sup>。这些结果表明,采用16-QAM和64-QAM格式来增加频谱效率的方法具有非常大的挑战性。因此,基于高阶QAM的高谱效率传输,由于在相同比特率下有更小的电带宽,在 $\text{OSNR}$ 要求高的短距离光网络中显示出更好的系统性能。

另一方面,随着高频谱效率相干探测和DSP的发展,基于奈奎斯特波分复用(N-WDM)和超奈奎斯特波分复用(SN-WDM)的频谱整形技术在100 Gbit/s的长距离传输领域成为了研究热点。目前研究表明,QPSK调制格式能最好地兼顾频谱效率和传输距离。因此,通过频谱整形技术实现N-WDM或SN-WDM来增加PDM-QPSK系统的频谱效率,成为了未来长距离大容量光传输网络中有前景且高效率的解决方案<sup>[11-21]</sup>。然而,滤波整形及DSP会引起码间串扰(ISI)、信道间串扰和噪声放大,严重影响系统性能<sup>[11-16]</sup>。使用恒模算法(CMA)等线性均衡算法时,信号频谱中的高频噪声和信道间串扰都会加强。为了补偿其带来性能损伤,需要能实现噪声抑制和多符号探测判决的额外处理。在文献[11-16]的工作中,使用了一种延时相加的后端滤波器来抑制增强的噪声。此外,还引入1比特最大似然序列估计(MLSE)来均衡ISI损伤。但是问题并没有完全解决。首先,虽然包含后端滤波器的恒模均衡(CMEQ)算法已被广泛地应用于

100 GHz以上的光Nyquist和Super-Nyquist传输<sup>[14-16]</sup>,但包括载波恢复在内的部分DSP模块仍然会受到噪声和串扰的影响。其次,集成度不高且价格昂贵的波长选择开关(WSS)不容易集成到传统光收发机,特别是在多信道系统中。此外,滤波中心窗口的不稳定性可能会导致系统性能的严重恶化。因此,我们使用了高采样率和高模拟带宽的数模转换器(DAC),通过DAC中数百个抽头的数字滤波器实现频谱整形。这种方案不增加额外设备并且参数容易重新设置,可以与发射机中倾斜校正等其他功能整合,波分复用(WDM)信道也可通过光耦合器实现复用。

本文主要研究了光接入网络中的高频谱效率和长距离传输数字信号处理(DSP)算法。在长距离传输方面,分别研究并演示了基于后处理(接收机端)和预处理(发射机端)的超奈奎斯特波分复用系统(WDM)系统。提出并验证了一种基于光Super-Nyquist滤波的类9-QAM信号多模均衡(MMEQ)DSP方案,通过级联多模算法(CMMA)直接从类9-QAM信号中恢复出QPSK信号<sup>[29-30]</sup>。此外,针对双二进制信号(QDB)信号,在不同滤波带宽、载波间隔和传输距离的条件下,研究并比较了带有后滤波的CMEQ方案以及MMEQ方案的系统性能,实现了频谱效率到达4 bps/Hz的QPSK信号传输。同时,提出了一种新的数字Super-Nyquist信号产生方案,这种方案可以有效抑制Nyquist信号带宽,降低信道串扰,并且不需要预滤波。产生的Super-Nyquist 9-QAM信号的频谱比普通Nyquist QPSK信号更为压缩,WDM信道复用只需要光耦合器来实现。采用此方法,除去20%软判决前向纠错(FEC)开销后,净频谱效率也可达到4 bps/Hz。我们还结合高阶QAM调制技术,将数字信号处理应用于短距离光传输网络,提出并实验验证了基于直接调制激光器(DML)、直接探

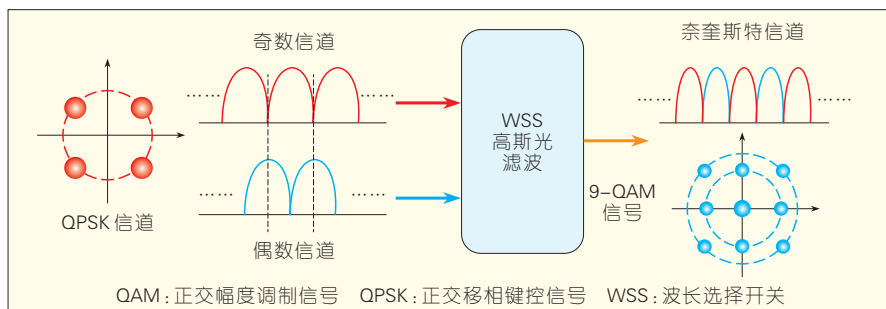
测和数字均衡的高速无载波幅度相位-64状态正交振幅调制(CAP-64-QAM)系统。其中,使用基于判决反馈的最小均方法(DD-LMS)来均衡CAP-64-QAM信号。采用此方案,基于DML和直接探测技术,我们成功产生了高速CAP-64-QAM信号,并在20 km标准单模光纤(SSMF)上传输了创纪录的60 Gbit/s速率。最后本文将介绍基于数字信号处理的实时相干系统的最新研究进展。

## 1 光超奈奎斯特信道中基于MMEQ的后处理算法

光域Super-Nyquist整形可以通过4阶超高斯窄带滤波实现,如波长选择开关(WSS)<sup>[11-16]</sup>。对于符号率为 $R_s$ 的PM-QPSK信号,我们采用3 dB带宽小于或等于 $R_s$ 的滤波整形设备来实现QDB频谱整形。由于滤波效应,4点QPSK信号在星座点上变为类9-QAM信号。

与QPSK信号相比,QDB信号的频谱更窄并且旁瓣被抑制。传统的Nyquist信号一般通过带宽与符号率相等的升余弦函数产生,这里,我们使用3 dB带宽低于信号波特率的滤波器,提出了一种达到Super-Nyquist频谱效率极限的方案。基于光高斯滤波从QPSK信号中产生Super-Nyquist滤波类9-QAM信号WDM信道的原理如图1所示。

DSP模块流程如图2所示。图2(a)和图2(b)显示了两种不同处理方案的DSP模块流程。文献[11-16]广泛应用了基于恒模算法(CMA)和后滤波的恒模均衡(CMEQ)算法,而文献[29-30]介绍了我们最近提出的MMEQ方案。对于有后滤波的CMEQ,接收到的信号先被恢复成QPSK,然后通用延时相加后滤波转换为类9-QAM信号来抑制噪声。而在MMEQ方案中,我们使用CMMA算法将QDB信号恢复成3个模的类9-QAM信号,再通过一种改进的载波相位恢复算法直接得到9-QAM信号。



▲图1 基于光高斯滤波从QPSK信号中产生Super-Nyquist滤波类9-QAM信号WDM信道的原理

详细的DSP算法见文献[29]。经过每个DSP模块处理后的信号星座图如图2所示。利用MMEQ算法处理QDB滤波信号的主要优势在于,自适应MMEQ抽头的频率响应对高频部分有压缩效应,与CMEQ相比可以避免噪声和串扰带来的性能恶化。图2(c)显示了使用3 dB带宽为22 GHz的QDB滤波时,采用不同处理方案的信号频谱图。可以看到,经过CMEQ算法之后, $\pm R_s/2$ 附近的高频部分被恢复的同时,噪声和串扰也随之加强。然而,经过基于CMMA的MMEQ算法处理后,噪声和串扰被明显抑制。被抑制的噪声主要是高频部分附近的信道内噪声,如放大自发辐射噪声(ASE)和ISI噪声。因此,在基于CMEQ算法的方案中,需要在载波相位恢复之后加入后滤波来抑制噪声和串扰<sup>[11-16]</sup>,但其中的一些DSP模块,如载波相位恢复过程仍然会处于噪声和串扰的影响下。与之相比,采用MMEQ算法,在DSP的初始阶段就很好地抑制了噪声和串扰,从而带来更好的系统性能。

为了比较CMEQ和MMEQ算法对噪声和串扰抑制的滤波容忍性,我们设计了一个28 Gbaud的QDB滤波的8信道PM-QPSK实验。该实验系统传输速率为 $8 \times 112$  Gbit/s,信道间隔为25 GHz。传输光纤为单模光纤(SMF-28),由10段88 km的循环光纤环路组成,平均损耗为18.5 dB,色度色散(CD)为17 ps/km/nm。每段的88 km光纤传输前都加入一个EDFA

用来补偿光纤损耗。此外,光纤环中还接入一个编程控制的WSS,作为光带通滤波器来抑制ASE噪声。此WSS具有4阶高斯频谱特性,3 dB带宽为2.2 nm。在接收端,使用一个3 dB带宽为0.34 nm的可调带通滤波器(BPF)来选择需要测量的子信道,并

采用偏振和相位分集的零差相干探测。发射机和接收机中本振(LO)的外腔激光器(ECL)线宽约为100 kHz,平衡光电二极管(BPD)的3 dB带宽为42 GHz,BPD中每个光电二极管的工作平均光输入功率从-20 dBm到13 dBm变化。接收到的信号功率为3 dBm,光混频器前经预放大的LO的功率为20 dBm。采样率为80 GSa/s、带宽30 GHz的数字采样示波器用于模拟数字转换(ADC),相邻信道的串扰会在ADC后被抑制,不需要在离线处理中加入额外的滤波器。

结果表明,MMEQ比带有后滤波的CMEQ方案有更好的BER性能,因为MMEQ方案有更好的噪声和串扰抑制效果。当滤波器的带宽为20.1 GHz时,采用MMEQ方案时,

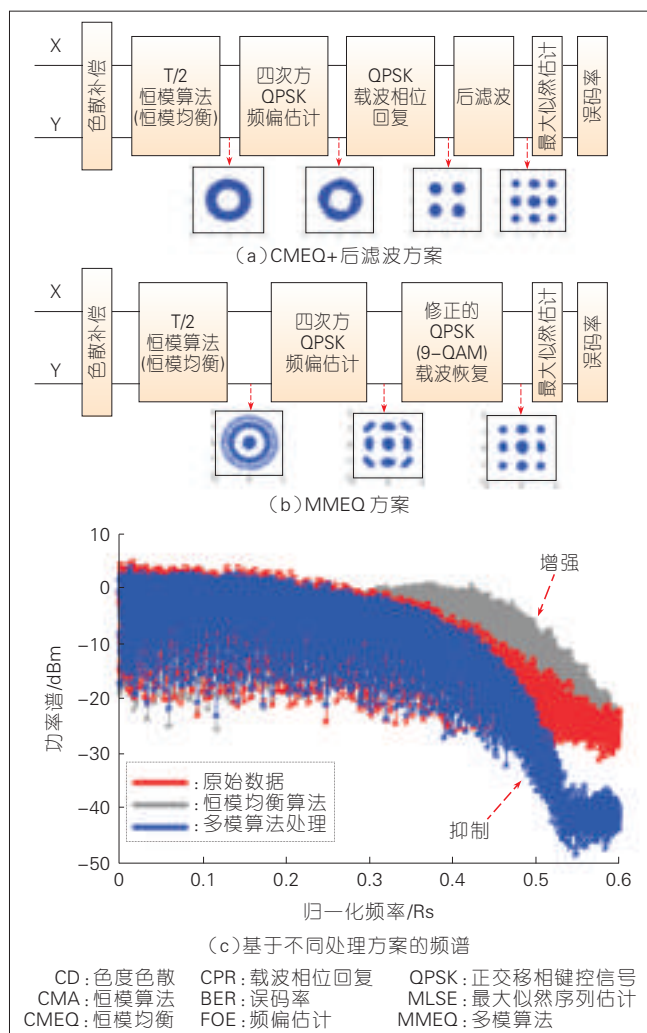


图2 DSP模块流程



BER=1×10<sup>-3</sup> 所对应的 OSNR 大约为 16.5 dB, 与后滤波 CMEQ 方案相比有 1 dB 改善。此外, MMEQ 方案明显改善了对噪声和串扰的滤波容忍性, 25 GHz QDB 信号的最大传输距离可达到 2 640 km; 然而对于后滤波 CMEQ, 在低于 FEC 限的 BER 下最大传输距离约为 2 000 km。因此, 相比后滤波的 CMEQ 方案, MMEQ 方案有更好的传输性能, 在 BER 为 3.8×10<sup>-3</sup> 时传输距离增加了 32%。

## 2 数字超奈奎斯特产生和处理中的预处理算法

图 3 显示了基于 DAC 的 Super-Nyquist 9-QAM 信号与普通 Nyquist QPSK 信号在产生原理上的不同。普通的 Nyquist 滤波时, 只需要一个平方根升余弦 (SRRC) 滤波器来产生 Nyquist 脉冲。然而, 当信道间隔小于符号速率时, 超出信道间隔的带宽会导致严重的串扰, 如图 3 所示。为了实现 Super-Nyquist 传输, 我们增加了一个低通滤波器 (LPF) 来产生 Super-Nyquist 脉冲。通过这种方式, 信号频谱被进一步压缩以减少信道串扰。在我们的方案中, 低通滤波器可以通过双二进制 (QDB) 延时相加实现, 其传递函数的 z 变换为:

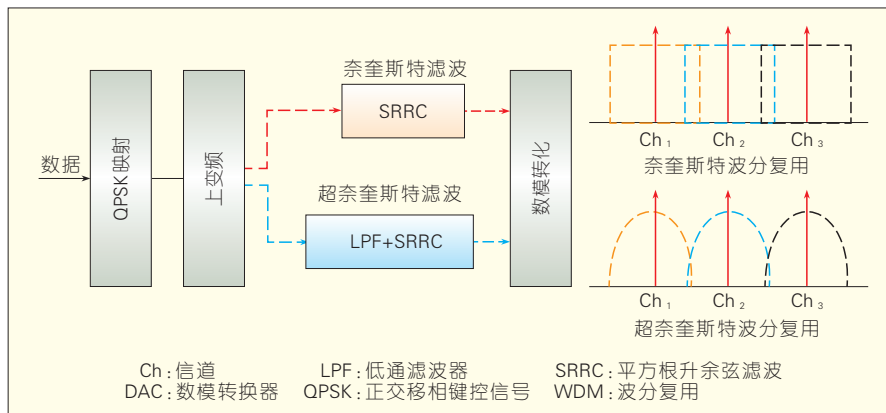
$$H_{QDB}(z) = 1 + z^{-1} \quad (1)$$

上述低通滤波器可以通过 2 抽头的 FIR 滤波器实现, 将 QPSK 转化为 9-QAM 信号<sup>[11-16]</sup>。通过 QDB 和 SRRC 滤波器的级联, Super-Nyquist 数字滤波器在时域可以表示为:

$$H_{SN}(t) = h_{QDB}(t) \otimes h_{SRRC}(t) \quad (2)$$

其中,  $h_{SRRC}(t)$  是 SRRC 滤波器的时域脉冲响应, 具体见文献[17-20];  $h_{QDB}(t)$  是公式(1)中 QDB 滤波器的脉冲响应。

图 4(a) 和(d)分别是基于 SRRC 的普通 Nyquist 滤波器和基于级联 QDB 和 SRRC 滤波器的 Super-Nyquist 滤波器的时域脉冲响应, 其中, SRRC



▲图3 基于DAC的Nyquist和Super-Nyquist 9-QAM信号产生原理

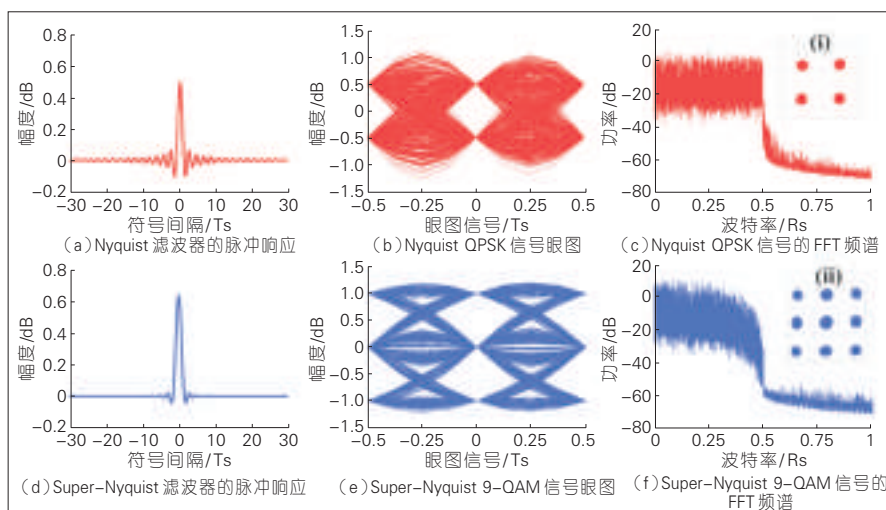
的滚降系数设置为0。可以看到, Super-Nyquist 数字滤波器与传统 Nyquist 滤波器相比, 谐振更少且收敛更快。图 4(b) 和(e)显示了传统的 Nyquist QPSK 2 电平基带信号和 Super-Nyquist 9-QAM 3 电平基带信号的眼图。图 4(c) 和(f)分别显示了 Nyquist QPSK 和 Super-Nyquist 9-QAM 信号的电功率频谱。可以看到, 与 Nyquist 信号相比, Super-Nyquist 信号的功率谱被严重压缩, 频谱旁瓣也被很大程度地抑制, 3 dB 带宽小于 0.5 倍波特率。

## 3 采用直接探测和高级数字均衡技术的 CAP-64-QAM 短距离传输

如第一部分所分析的, 基于高阶

QAM 的高频谱效率传输, 由于其在给定比特率下有更小的电带宽, 在 OSNR 要求较高的短距离光网络中显示了更好的性能。另一方面, 随着接入网和数据中心互联光链路等短距离通信带宽需求的快速增长, 如何增加传输容量成为了研究热点<sup>[5-6]</sup>。考虑到成本和复杂度, 采用高阶调制格式的强度调制和直接探测 (IM/DD) 是一种普遍应用的可行方案<sup>[5-6, 31-41]</sup>。许多基于 IM/DD 的调制技术已经被提出, 如 QAM-副载波调制 (SCM)<sup>[5-6]</sup>, 脉冲幅度调制 (PAM)<sup>[31]</sup>, 离散多音 (DMT), 正交频分复用 (OFDM)<sup>[32-33]</sup> 以及无载波幅度相位调制 (CAP)<sup>[34-41]</sup>。

研究表明, 基于 IM/DD 的 CAP 结构可以在保证良好性能的前提下降低复杂度, 仅使用 DML、垂直腔表面



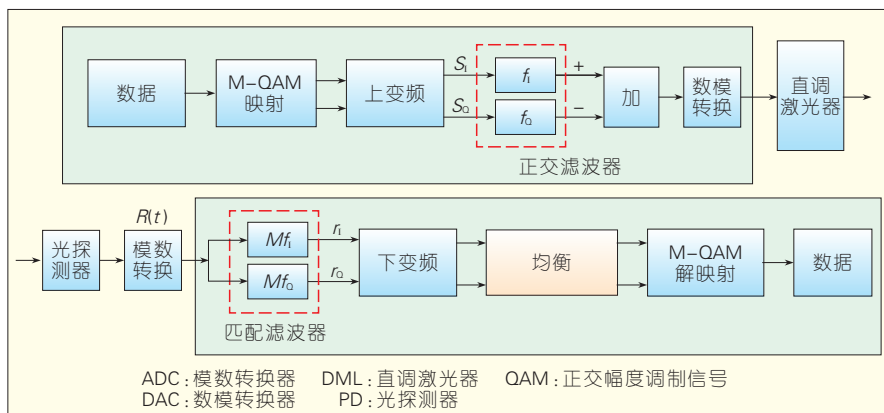
▲图4 Nyquist和Super-Nyquist的区别



发射激光器 (VCSEL) 和带宽有限的光电器件等低成本原件, 依然能够提供较高的数据传输速率<sup>[34-42]</sup>。与 QAM-SCM<sup>[5-6]</sup> 和 OFDM<sup>[32-33]</sup> 相比, CAP 不需要电域的复数到实数转换、复杂的混频器、射频源和光同相正交 (I/Q) 调制器, 同时也省去了 OFDM 信号调制和解调过程中的离散傅里叶变换 (DFT)<sup>[40]</sup>。文献[35-42]展示了多种基于 CAP 的光通信系统。文献[38]证明多频带 CAP-QAM 可以有效提高短距离通信的带宽。

在文献[42]中, 提出了基于 CAP-16-QAM 和 CAP-64-QAM 的系统, 但其比特率分别只有 2 Gbit/s 和 2.1 Gbit/s。在文献[40]中, 使用基于 CMMA 的数字均衡器来均衡 CAP-16-QAM 信号的 ISI, 并取得了良好性能。然而, 高阶调制格式的 CAP 系统, 如速率高达数十吉比特每秒的 CAP-64-QAM 并没有被演示, 其对应的数字均衡技术也没有深入研究。因此, 我们提出并实验验证了一种基于 DML、直接探测和数字均衡技术的高速 CAP-64-QAM 系统。

图 5 显示了采用 DML、直接探测和数字均衡的 CAP M-QAM 系统发射机和接收机原理。CAP 贝尔实验室首先提出了 CAP 这种适合短距离通信的多阶多维调制格式<sup>[34-43]</sup>, 这种调制格式与 QAM 信号类似, 但不需要射频源。二维 CAP 可以通过图 5 中的两个正交滤波器  $f_i$  和  $f_0$  实现。原始比特序列先被映射为 M-QAM 的复数符号 (M 是 QAM 的阶数), 随后, 为了匹配整形滤波器的采样率, 映射后的复数符号经过上采样处理, 整形滤波器的采样率由数据波特率和 DAC 采样率共同决定。两路滤波器的输出合并后, 进行 DAC 处理, 形成  $S(t)$  用来驱动 DML。接收端采用直接探测, 经过 ADC 后的信号被送入两个匹配滤波器来分离同相和正交分量。下采样之后, 经过线性均衡器和 M-QAM 解调过程, 即可得到原始的比特序列。



▲ 图 5 采用 DML、直接探测和数字均衡的 CAP M-QAM 系统发射机和接收机原理

$f_i(t)$ 、 $f_0(t)$  表示一对正交的匹配滤波器对,  $M_{f_i}(t)$ 、 $M_{f_0}(t)$  是其对应的整形滤波器, 这两对滤波器在发射机和接收机组成了希尔伯特 (Hilbert) 对。两个正交滤波器可以通过乘以  $\sin$  和  $\cos$  函数的平方根升余弦脉冲来构建, 具体见文献[43]。因此, 匹配滤波器对的关系为:  $M_{f_i}(t) = f_i^*(-t)$  和  $M_{f_0}(t) = f_0^*(-t)$ 。由于滤波器的正交性, 同相和正交数据可以通过正交匹配滤波器得到。为了准确地恢复同相和正交数据, CAP 解调中的同步非常重要, 因为匹配有限冲击响应滤波器 (FIR) 的时间错误会引入严重的 ISI<sup>[40-42]</sup>。由于最合适的采样点难以判断, 采样时间点的偏差将会使得后续信号被 ISI 和同相正交间的串扰严重影响, 从而导致星座点的模糊和相位旋转。

因此, 在下采样之后, 需要使用一个线性均衡器来处理复数信号, 经 QAM 解码后得到原始信号。在我们的系统中, 正交滤波器和匹配滤波器都通过数字 FIR 滤波器实现, 抽头长度分别为 T-OFL 和 R-MFL。如文献[40]中所分析的, FIR 滤波器的抽头长度决定了滤波器的时域脉冲形状和频率响应, FIR 滤波器的抽头长度对系统性能的影响也在实验中进行了讨论。

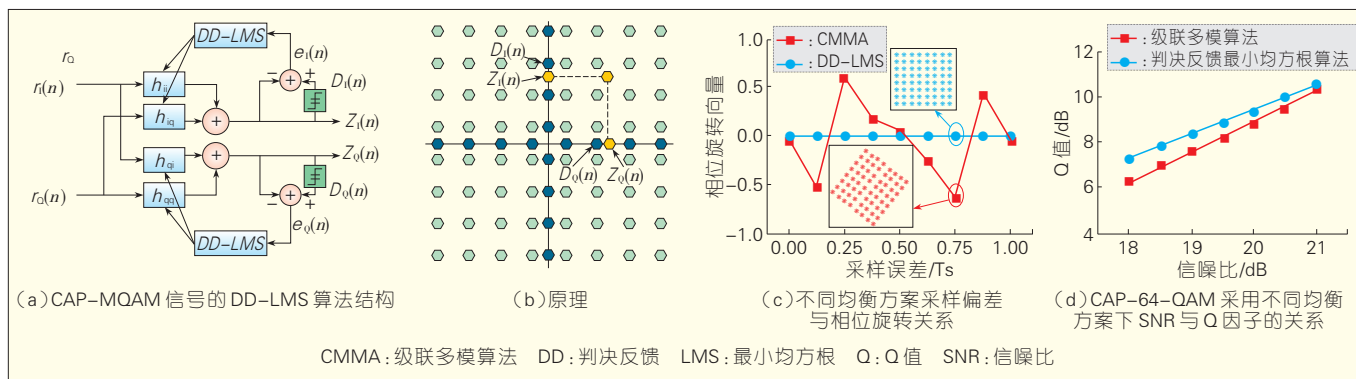
在之前的工作中, 采用了 ISI 均衡和相位恢复算法相结合的两级均衡方案来均衡 CAP 信号, 具体过程为

先用 CMA 进行预收敛, 再用 CMMA 算法实现 ISI 均衡。然而对于高阶 CAP-QAM 信号, 由于 QAM 中环的间隔一般小于符号间最小间隔, CMMA 均衡效果不甚理想。之前的研究已经证明, 对于高阶 QAM 信号, DD-LMS 可以实现比 CMMA 更好的 SNR 性能<sup>[22]</sup>。另一方面, 因为 CMA 的收敛原则是基于符号的模值, 是一种独立于相位的算法, 所以还需要在 CMMA 之后再再进行额外的相位恢复来均衡串扰。

因此, 我们提出了一种新型的 DSP 算法来均衡 CAP-QAM 信号中的 ISI 和串扰: 在 CMA 预收敛之后, 使用一个基于 DD-LMS 的一级均衡器来调整 FIR 滤波器的抽头系数。图 6 (a) 和图 6 (b) 显示了 DD-LMS 算法的结构和原理。用于 CAP 信号均衡的 FIR 滤波器是一种  $T/2$  间隔的蝶形自适应数字滤波器结构。与相干光系统中采用的 DD-LMS 不同, FIR 滤波器的 4 个时域抽头系统都是实数。  $Z_i(n)$  和  $Z_0(n)$  分别表示滤波器在  $n$  次均衡后的同相和正交信号输出。  $D_i(n)$  和  $D_0(n)$  是同相和正交信号的判决结果。虽然同相和正交信号输入独立, 但每个输出与两个输入都相关。DD-LMS 的错误函数可以被表示为:

$$e_{i0}(n) = D_{i0}(n) - Z_{i0}(n) \quad (3)$$

其中  $e_i(n)$  和  $e_0(n)$  是同相和正交



▲ 图6 CMMA和DD-LMS两种方案的仿真比较

信号的错误函数, 4个实数值的 FIR 滤波器  $h_{ii}$ 、 $h_{iq}$ 、 $h_{qi}$  和  $h_{qq}$  在判决后由错误函数进行更新:

$$h_{ii}(n) = h_{ii}(n-1) + \mu e_i(n) r_i(n) \quad (4)$$

$$h_{qi}(n) = h_{qi}(n-1) + \mu e_i(n) r_q(n) \quad (5)$$

$$h_{iq}(n) = h_{iq}(n-1) + \mu e_q(n) r_i(n) \quad (6)$$

$$h_{qq}(n) = h_{qq}(n-1) + \mu e_q(n) r_q(n) \quad (7)$$

通过此方法, 同相和正交信号的 ISI 和串扰都可以被消除。

我们通过仿真比较了 CMMA 和 DD-LMS 两种方案。对 CAP-64-QAM 信号的均衡效果, 如图 6(c) 和图 6(d) 所示。图 6(c) 显示了 CMMA 和 DD-LMS 两种均衡方案的采样偏差与相位旋转的关系, 此时的上采样率是 8 Sa/符号。可以看到, 时钟偏差引入的相位旋转无法通过 CMMA 补偿, 需要在 CMMA 之后进行额外的相位恢复处理。然而使用 DD-LMS 算法, 接收信号的相位得到了的正确恢复, 因为 DD-LMS 对相位信息十分敏感。图 6(d) 表示在不同均衡方案下, 接收信号的 Q 值与 SNR 的关系。结果表明, 对于 CAP-64-QAM 信号, DD-LMS 比 CMMA 算法的 Q 值更高。因为对于 CAP-64-QAM 信号, DD-LMS 的错误函数基于符号间间隔, 而 CMMA 是基于环间间隔, QAM 的环间距离一般小于最小符号间隔, 所以 DD-LMS 算法表现出了更好的性能。

上述结果表明, 我们提出的利用 DML、直接探测和改进的 DD-LMS 均衡的 CAP-64-QAM 系统具有很强的

可行性。

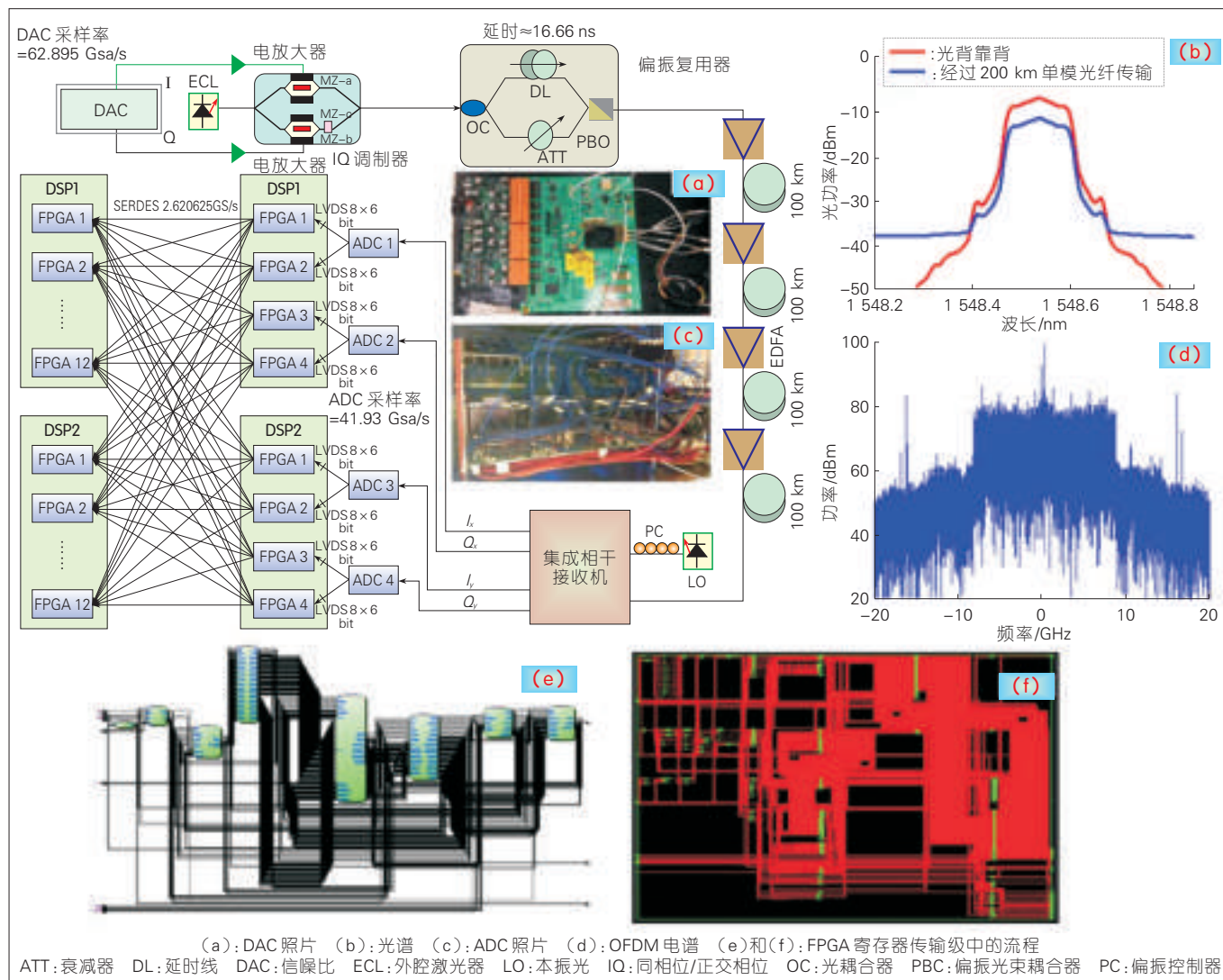
#### 4 基于数字信号处理的实时相干系统

我们首次实现了单光源传输速率 100 Gbit/s 的偏振复用 16-QAM-OFDM 相干光实时传输系统<sup>[44]</sup>。OFDM 信号频谱效率高, 频谱资源可以动态分配, 并且能够有效的抵抗光纤传输中的色散, 是业内一直在研究的高级调制格式。实验装置如图 7 所示。实验中激光器波长为 1 548.53 nm, 激光器线宽小于 100 kHz。DAC 产生的 16-QAM-OFDM 信号经过电放大后驱动光的 IQ 调制器。DAC 取样速率为 62.895 GSa/s。在 OFDM 调制中 FFT 尺寸为 1 024, 其中 256 个子载波载数据, 8 个子载波载导频信号, 第一个子载波置零, 其他子载波均置零。实验中采用 DFT-spread 技术在信号子载波中均匀分配信噪比和减小峰均比, 并采用频域内的滑动平均 (ISFA) 的方式来消除信道估计中光纤信道中的噪声的影响, 以此提高系统的误码性能。经过反傅立叶变换后, 24 个取样点用来做循环前缀。接收端的 ADC 取样速率为 41.93 GSa/s, 带宽为 16 GHz。DAC 和 ADC 分辨率分别为 8 比特和 6 比特。用来做 FPGA 的芯片型号分别为 EP4S100G 和的 6VSX475 FPGA<sup>[44]</sup>。图 7 中给出了 DAC 和 ADC 照片, 信号光谱和电谱图以及 FPGA 的寄存器传输级的流程图。在无电色散补偿的情况下, 100 Gbit/s 偏振复

用 16-QAM-OFDM 经过 200 km 传输后误码率小于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。

#### 5 结束语

本文主要研究了光接入网络中高频谱效率和长距离传输的数字信号处理 (DSP) 算法。为了提高 QPSK 信号的频谱效率, 提出并研究了两种基于发射端预处理和接收端后处理的 Super-Nyquist WDM 算法。提出并验证了一种基于光 Super-Nyquist 滤波的类 9-QAM 信号多模均衡 (MMEQ) DSP 方案, 通过级联多模算法 (CMMA) 直接从类 9-QAM 信号中恢复出 QPSK 信号。此外, 针对双二进制信号 (QDB) 信号, 在不同滤波带宽、载波间隔和传输距离的条件下, 研究并比较了带有后滤波的 CMEQ 方案和 MMEQ 方案的系统性能。同时, 提出了一种新型的数字 Super-Nyquist 信号产生方案, 进一步压缩 Nyquist 信号带宽, 减少信道串扰, 并且不需要光预滤波。采用这种方案, 产生的 Super-Nyquist 9-QAM 信号的频谱与普通 Nyquist QPSK 信号相比要更为压缩, 并且只需要光耦合器就能进行 Super-Nyquist WDM 信道复用, 净频谱效率达到 4 bps/Hz (除去 20% 软判决 FEC 开销)。我们还将高阶 QAM 的数字信号处理算法拓展到短距离光传输网络, 提出并实验验证了基于 DML、直接探测和数字均衡的高速 CAP-64-QAM 系统。DD-LMS 被用来均衡 CAP-64-QAM 信号。采用此



▲图7 100 GHz 16-QAM-OFDM实时系统

方案,我们成功产生并实现了基于DML和直接探测的60 Gbit/s CAP-64-QAM的20 km标准单模光纤传输。我们首次实现了单光波传输速率100 Gbit/s的实时相干光偏振复用16-QAM-OFDM传输系统。在实时系统的数字信号处理算法中,我们创新地提出通过只比较信号的符号位,将复杂的浮点乘法优化为简单的异或操作,大大降低了时域同步和频偏估计的算法复杂度。通过采用无信号失真的DFT-spread技术来降低OFDM信号的峰均功率比(PAPR),并采用频域内的滑动平均(ISFA)的方式来消除信道估计中光纤信道中的噪声

的影响,以此提高系统的误码性能。我们的研究成果为信道速率高达100 Gbit/s的局域网实时传输技术提供了可靠的备选方案。

#### 参考文献

- [1] SWANSON B, GILDER G. Estimating the Exaflood - The impact of video and rich media on the internet - A zettabyte by 2015? [R]. Discovery Institute, 2008.
- [2] TKACH R. Scaling optical communications for the next decade and beyond [R]. Bell Labs Technol., 2010,14(4):3-9.
- [3] ESSIAMBRE R J, TKACH R. Capacity trends and limits of optical communication networks [R]. IEEE, 2012,100(4):1-21.
- [4] INDE C V N. Forecast and Methodology, 2010-2015 [R]. Cisco Systems, 2011.
- [5] SZCZERBA K, OLSSON B E, WESTBERGH P, RHODIN A, GUSTAVSSON J, HAGLUND A, KARLSSON M, LARSSON A,

ANDREKSON P. 37 Gbit/s transmission over 200 m of MMF using single cycle subcarrier modulation and a VCSEL with 20 GHz modulation bandwidth [R]. OFC, 2010.

- [6] KARAR A. S, CARTLEDGE J C. Generation and Detection of a 56 Gbit/s Signal Using a DML and Half-Cycle 16-QAM Nyquist-SCM [J]. IEEE Photon. Technol., 2013,25(8): 757-760.
- [7] ROBERTS K, O'SULLIVAN M, WU K T, SUN H, AWADALLA A, KRAUSE D J, LAPERLE C. Performance of Dual-Polarization QPSK for Optical Transport Systems [J]. Lightwave Technol., 2009,27(16): 3546-3559.
- [8] RENAUDIER J, BERTRAN-PARDO O, MARDOYAN H, TRAN P, CHARLET G, BIGO S, LEFRANCOIS M, LAVIGNE B, AUGÉ J L, PIRIOU L, COURTOIS O. Performance comparison of 40G and 100G coherent PDM-QPSK for upgrading dispersion managed legacy systems [R]. OFC, 2009.
- [9] XIE C, RAYBON G, WINZER P J. Transmission of mixed 224-Gbit/s and 112-Gbit/s PDM-QPSK at 50-GHz channel



- spacing over 1200-km dispersion-managed LEAF® spans and Three ROADMs [J]. Lightwave Technol., 2012,30(4): 547-552.
- [10] CAI J X, DAVIDSON C R, LUCERO A, ZHANG H, FOURSA D G, SINKIN O V, PATTERSON W W, PILIPETSKII A N, MOHS G, BERGANO N S. 20 Tbit/s transmission over 6860 km with sub-Nyquist channel spacing [J]. Lightwave Technol., 2012,30(4): 651-657.
- [11] LI J, TAO Z, ZHANG H, YAN W, HOSHIDA T, RASMUSSEN J C. Spectrally Efficient Quadrature Duobinary Coherent Systems With Symbol-Rate Digital Signal Processing [J]. Lightw. Technol., 2011,29(8): 1098-1104.
- [12] LI J, TIPSUWANNAKUL E, ERIKSSON T, KARLSSON M, ANDREKSON P A. Approaching Nyquist Limit in WDM Systems by Low-Complexity Receiver-Side Duobinary Shaping [J]. Lightwave Technol., 2012,30(24): 1664-1676.
- [13] JIA Z, YU J, CHIEN H, DONG Z, HUO D. Field Transmission of 100 G and Beyond: Multiple Baud Rates and Mixed Line Rates Using Nyquist-WDM Technology [J]. Lightwave Technol., 2012,30(24): 3793-3804.
- [14] DONG D, YU J, JIA Z, CHIEN H, LI X, CHANG G K.  $7 \times 224$  Gbit/s/ch Nyquist-WDM Transmission Over 1600-km SMF-28 Using PDM-CSRZ-QPSK Modulation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012,24(13):125-129.
- [15] YU J, DONG Z, CHIEN H, JIA Z, LI X, HUO D, GUNKEL W, WAGNER P, MAYER H, SCHIPPEL A. Transmission of 200 G PDM-CSRZ-QPSK and PDM-16 QAM With a SE of 4 bit/s/Hz [J]. Lightwave Technol., 2013, 31(5): 515-522.
- [16] CHIEN H, YU J, JIA Z, DONG Z, XIAO X. Performance Assessment of Noise-Suppressed Nyquist-WDM for Terabit Superchannel Transmission [J]. Lightwave Technol., 2012,30(24): 3965-3971.
- [17] WANG J, XIE C, PAN Z. Generation of Spectrally Efficient Nyquist-WDM QPSK Signals using DSP Techniques at Transmitter [R]. OFC, 2012.
- [18] PARDO B, RENAUDIER J, TRAN P, MARDOYAN H, BRINDEL P, GHAZISAEIDI A, SALS I M T, CHARLET G, BIGO S. Submarine transmissions with spectral efficiency higher than 3 bit/s/Hz using Nyquist pulse-shaped channels [R]. OFC, 2013.
- [19] JUAN Q, MAO B, GONZALEZ N, BINH N, STOJANOVIC N. Generation of 28GBaud and 32GBaud PDM-Nyquist-QPSK by a DAC with 11.3GHz Analog Bandwidth [R]. OFC, 2013.
- [20] WANG J, XIE C, PAN Z. Generation of Spectrally Efficient Nyquist-WDM QPSK Signals Using Digital FIR or FDE Filters at Transmitters [J]. Lightwave Technol., 2012, 30(24): 3679-3686.
- [21] CAI J X. 100G Transmission Over Transoceanic Distance With High Spectral Efficiency and Large Capacity [J]. Lightwave Technol., 2012,30(24): 3845-3856.
- [22] ZHOU X, NELSON L E, MAGILL P, ISAAC R, ZHU B, PECKHAM D W, BOREL P I, CARLSON K. High Spectral Efficiency 400 Gbit/s Transmission Using PDM Time-Domain Hybrid 32-64 QAM and Training-Assisted Carrier Recovery [J]. Lightwave Technol., 2013,31(21):999-1005.
- [23] ZHOU X, YU J, HUANG M F, SHAO Y. 64-Tbit/s, 8 bit/s/Hz, PDM-36QAM Transmission Over 320 km Using Both Pre- and Post-Transmission Digital Signal Processing [J]. Lightwave Technol., 2011,29(11):571-577.
- [24] KOIZUMI Y, TOYODA K, YOSHIDA M, NAKAZAWA M. 1024 QAM (60 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km [J]. Opt. Express., 2012,20(21): 12508-12514.
- [25] TOYODA K, KOIZUMI Y, OMIYA T, YOSHIDA M, HIROOKA T, NAKAZAWA M. Marked performance improvement of 256 QAM transmission using a digital back-propagation method [J]. Opt. Express., 2012,20(21):19815-19821.
- [26] KOIZUMI Y, TOYODA K, OMIYA T, YOSHIDA M, HIROOKA T, NAKAZAWA M. 512 QAM transmission over 240 km using frequency-domain equalization in a digital coherent receiver [J]. Opt. Express., 2012, 20(21):23383-23389.
- [27] WINZER P J, GNAUCK A H, CHANDRASEKHAR S, DRAVING S, EVANGELISTA J, ZHU B. Generation and 1, 200-km Transmission of 448-Gbit/s ETDM 56-Gbaud PDM 16-QAM using a Single I/Q Modulator [R]. OFC, 2010.
- [28] BUCHALI F, SCHUH K, ROSENER D, LACH E, DISCHLER R, IDLER W, SCHMALEN L, LEVEN A, BRAUN R P, EHRHARDT A, GERLACH C, SCHURER L. 512-Gbit/s DP-16-QAM field trial over 734 km installed SSMF with co-propagating 10 Gbit/s NRZ neighbors incorporating soft-FEC decoding [R]. OFC, 2010.
- [29] ZHANG J, YU J, CHI N, DONG Z, YU J, LI X, TAO L, SHAO Y. Multi-Modulus Blind Equalizations for Coherent Quadrature Duobinary Spectrum Shaped PM-QPSK Digital Signal Processing [J]. Lightwave Technol., 2013,31(21):1073-1078.
- [30] ZHANG J, HUANG B, LI X. Improved quadrature duobinary system performance using multi-modulus equalization [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2013,25(16): 1630-1633.
- [31] RODES R, MÜELLER M, LI B, ESTARAN J, JENSEN J B, GRUENDL T, ORTSIEFER M, NEUMEYER C, ROSSKOPF J, LARSEN K J, AMANN M C, MONROY I T. High-Speed 1550 nm VCSEL Data Transmission Link Employing 25 Gb/s 4-PAM Modulation and Hard Decision Forward Error Correction [J]. Lightwave Technol., 2013,31(21): 689-695.
- [32] TANAKA T, NISHIHARA M, TAKAHARA T, LI L, TAO Z, RASMUSSEN J C. 50 Gbit/s class transmission in single mode fiber using discrete multi-tone modulation with 10G directly modulated laser [R]. OFC, 2012.
- [33] GIDDINGS R P, JIN X Q, HUGUES-SALAS E, GIACOMIDIS E, WEI J L, TANG J M. Experimental demonstration of a record high 11.25 Gbit/s real-time optical OFDM transceiver supporting 25 km SMF end-to-end transmission in simple IMDD systems [J]. Opt. Express, 2010,18(6): 5541-5555.
- [34] WEI J L, INGHAM J D, CUNNINGHAM D G, PENTY R V, WHITE I H. Performance and power dissipation comparisons between 28 Gbit/s NRZ, PAM, CAP and optical OFDM systems for data communication applications [J]. Lightw. Technol., 2012,30(26): 3273-3280.
- [35] INGHAM J D, PENTY R, WHITE I, CUNNINGHAM D. 40 Gbit/s carrierless amplitude and phase modulation for low-cost optical data communication links [R]. OFC, 2012.
- [36] RODES R, WIECKOWSKI M, PHAM T T, JENSEN J B, TURKIEWICZ J, SIUZDAK J, MONROY I T. Carrierless amplitude phase modulation of VCSEL with 4 bit/s/Hz spectral efficiency for use in WDM-PON [J]. Opt. Express, 2011,19(27): 26551-26556.
- [37] OTHMAN M B, ZHANG X, DENG L, WIECKOWSKI M, JENSEN J, MONROY I T. Experimental Investigations of 3D/4D-CAP Modulation with DM-VCSELs [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012,24(22):2009-2012.
- [38] OLMEDO M I, ZUO T, JENSEN J B, ZHONG Q, XU X, MONROY I T. Towards 400GBASE 4-lane solution using direct detection of multiCAP signal in 14 GHz bandwidth per lane [R]. OFC, 2013.
- [39] WEI J, GENG L, CUNNINGHAM D G, PENTY R V, WHITE I. 100 Gigabit Ethernet transmission enabled by carrierless amplitude and phase modulation using QAM receivers [R]. OFC, 2013.
- [40] TAO L, WANG Y, GAO Y, LAU A P T, CHI N, LU C. Experimental demonstration of 10 Gbit/s multi-level carrier-less amplitude and phase modulation for short range optical communication systems [J]. Opt. Express, 2013,21(5): 6459-6465.
- [41] ZHANG J, YU J, LI F, CHI N, DONG Z, LI X.  $11 \times 5 \times 9.3$  Gbit/s WDM-CAP-PON based on optical single-side band multi-level multi-band carrier-less amplitude and phase modulation with direct detection [J]. Opt. Express, 2013,21(5): 18842-18848.
- [42] STEPNIAK G, SIUZDAK J. Transmission Beyond 2 Gbit/s in a 100 m SI POF with Multilevel CAP Modulation and Digital Equalization [R]. OFC, 2013.
- [43] IM G H, HARMAN D D, HUANG G, MANDZIK A V, NGUYEN M H, WERNER J J. 51.84 Mbit/s 16-CAP ATM LAN standard [J]. IEEE J. Sel. Areas Comm., 1995,13(4): 620-632.
- [44] XIAO X, LI F, YU J, LI X, XIA Y, CHEN Y. 100-Gbit/s Single-band Real-time Coherent Optical DP-16-QAM-OFDM Transmission and Reception [R]. OFC, 2014.

## 作者简介



余建军, 北京邮电大学博士毕业; 中兴通讯北美光波研究所所长、主任工程师; 从事高速光通信技术的研发; 已发表学术论文 400 余篇和出版著作 1 部。



# 无源光网络的运行、维护与管理

## Operation, Administration and Maintenance of Passive Optical Networks

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0017-005

**摘要:** 基于增强的电信管理运营图(eTOM),研究了无源光网络(PON)的运行、维护与管理系统的架构,该系统包括网络资源管理、装维流程管理、服务保障系统等子系统。结合电信运营商的实际需求,重点研究了智能光纤基础设施管理、终端零配置开通、光链路测量与诊断等关键技术,并分析了上述关键问题的发展趋势与部署策略。

**关键词:** 无源光网络;运行、维护和管理;智能光纤基础设施管理;服务开通;光链路测量与诊断

**Abstract:** In this paper, we propose an architecture based on eTOM for PON OAM. In this architecture, there are three sub-systems: network resource management, installation and maintenance process, and service support. We investigate the requirements of telecom operators as well as key technologies, such as intelligent fiber infrastructure management, zero-touch terminal installation, and optical link test and diagnosis. Based on general trend and up-to-date progress, these technologies' development path and deployment are presented.

**Key words:** passive optical networks; operation, administration and maintenance; intelligent fiber infrastructure management; service fulfillment; optical link test & diagnosis

沈成彬/SHEN Chengbin<sup>1</sup>蒋铭/JIANG Ming<sup>1</sup>王波/WANG Bo<sup>2</sup>

(1. 中国电信 上海研究院, 上海 200122;

2. 中国电信 技术部, 北京 100031)

(1. Shanghai Research Institute of China

Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China;

2. Department of Technologies of China

Telecom Group Company, Beijing 100031,

China)

近几年,全球运营商开始大规模地开展基于以太网无源光网络(EPON)和千兆比无源光网络(GPON)的光纤宽带(FTTX)网络建设,显著提升了宽带接入网的带宽提供能力和多业务承载能力。对于运营商来讲,无源光网络(PON)的运行、管理和维护已经成为关系到网络维护成本与效率、客户服务满意度、市场竞争力的关键,受到了高度的重视,已成为工作的重点。

PON网络的运营、管理和维护从早期的简单的以网元管理为中心发

展为覆盖了网络资源管理、服务开通与变更、服务保障等全流程的体系。PON网络的运行管理和维护系统的发展方向就是依托IT系统和各种运维技术手段,通过标准化的维护流程,提升PON网络运行维护的电子化、自动化、智能化水平。本文主要研究一种面向上述目标的PON网络运行管理和维护体系架构及其关键技术,并基于对相关技术的进展和发展趋势,分析PON网络运行维护和管理系统优化的方向。

### 1 PON网络运行、管理和维护体系架构

按照电信管理论坛(TMF)建立的增强的电信管理运营图(eTOM)模

型,电信运营商的运营支撑系统(OSS)主要实现服务准备、交付、生产保障等过程,并支撑BSS面向客户的产品销售和客户服务过程。OSS系统横向上包括运营支持准备(Operations Support & Readiness)、服务实现(Fulfillment)、业务保障(Assurance)和计费(Billing)等4类处理流程服务,纵向上包括基础通信网络、业务网络、客户网络与应用、第三方的服务提供商与合作伙伴管理等4个层次。服务实现流程主要是将客户的业务需求在工单流转、业务配置与激活、网络资源指配、供应商/合作伙伴管理等4个层面实现所需要的功能和流程。服务保障流程主要是为达到为客户提供持续可用且满足服务等级协议(SLA)所必须的流程和手段,包括资源状态和网络性能监控、网络故障的诊断和定位、故障的排除、故障汇报管理等内容。映射到固定宽带网络,eTOM模型可以简化为网络资源管理、服务开通、服务保障等3类处理流程。

PON是一个全新的网络,其点到多点的网络拓扑、网络接入模式和终端形态的多样化、多业务承载的复杂

收稿日期: 2014-07-07

网络出版时间: 2014-08-21

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2011AA01A104)

性,使得运营商无法在既有的面向数字用户线(DSL)接入的OSS系统上通过简单的改造实现PON网络的高效运行、管理和维护。具体来讲,体现在如下几个方面:

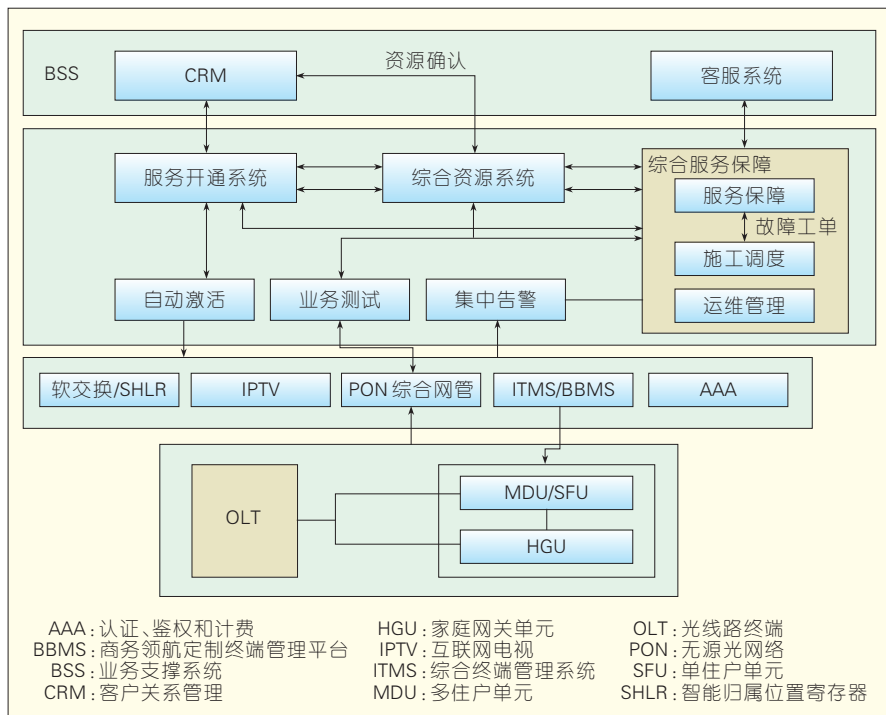
(1)在网络资源管理方面,FTTX网络提供多业务综合承载功能,使得光纤接入网与语音交换网、IP网、传输网、光缆与管道网、动力环境等多个专业高度融合,需要OSS实现集中的、全专业的综合网络资源管理,以提高对接入网资源管理的效率。

(2)在服务开通方面,光网业务上的复杂性也导致在服务开通流程的复杂性,比如电子工单的参数、工单流转的环节、各系统的工单接口都更加复杂,工单处理的异常增多。

(3)在服务保障方面,由于PON网络的接入方式、业务种类和终端类型更加丰富,PON网络自身拓扑以及与其他业务网络之间关系更加复杂,对服务保障系统的流程设计和技术手段提出了更高的要求。

基于上述分析,结合现有OSS系统的现状,我们提出了一PON网络运行管理维护的IT支撑系统架构,如图1所示。该系统的OSS主要包括综合资源系统、服务开通系统、综合服务保障系统等3个主要部分,并与自动激活系统模块、装维调度模块、集中告警模块等进行交互。通过这3个模块,运营商对光纤接入网,软交换,互联网电视(IPTV),终端远程管理(如ITMS/BBMS),认证、鉴权和计费(AAA)等相关系统进行指配、测试与监控<sup>[1]</sup>。

综合资源系统是PON网络运行管理和维护中最基础的系统,主要为资源确认、资源配置、故障定位、施工派单、业务割接等提供资源数据支撑。对于承载多业务的PON网络而言,综合资源系统所管理的系统包括PON、光配线网络(ODN)、城域网、软交换网络、IPTV等。目前,网络资源管理的热点是ODN资源的智能化管理,即智能光纤基础设施管理技术。



▲图1 典型的PON网络运营支撑系统架构

PON网络的服务开通系统以客户关系管理(CRM)系统为起始,通过与多个综合资源系统、综合服务保障、自动激活模块等系统的交互完成光网业务的装、移、拆、改、迁等流程的自动化。其中,CRM负责光进铜退相关产品的订单受理,调用资源管理功能进行资源能力确认和客户订单分解,派发激活工单到自动激活模块进行自动激活,派发外线施工工单到综合服务保障系统进行人工上门施工和外线施工完工确认测试。自动激活模块负责根据宽带提速(光进铜退)后的产品激活拆分规则并指配所有PON接入方式相关的网元/平台(PON综合网管、软交换网管、IPTV网管、ITMS/BBMS、AAA等)实现网络层和业务层的配置与使能,从而实现业务自动激活。PON网络的服务开通的关键是如何实现终端安装的零配置,以提高装维效率。

综合服务保障系统以CRM/客服系统为起始,通过与综合资源管理系统、服务开通系统的交互,支撑相关申告的受理、预处理、故障定位、故障

修复、网络和业务监控等功能。目前,光网服务保障系统的研究热点是故障定位,特别是光链路的测量与诊断等。

下面对PON网络的智能光纤基础设施管理、终端零配置开通、光链路测量与诊断等关键技术及其应用进行研究。

## 2 智能光纤基础设施管理技术

### 2.1 智能光纤基础设施管理系统

随着PON网络的大规模部署,海量光纤资源的管理成为重要课题。传统的纸质标签、人工录入的光纤资源管理方式,存在准确度、可靠性、自动化程度和维护效率低等问题。为了解决上述问题,业界一些专家提出了基于物联网技术的智能光纤基础设施管理技术<sup>[2-5]</sup>。

智能光分配网络将电子标签技术应用到传统光分配网络中,利用电子标签对光纤(包括尾纤、跳纤、光分路器尾纤等)进行唯一标识,应用IT

技术实现光纤信息自动存储、光纤连接关系自动识别、光纤资源信息校准、可视化施工指导等功能。智能光纤基础设施管理系统的架构如图2所示。智能光纤网络由智能光纤网

主流智能光纤基础设施管理系统产品中的eID和RFID进行了测试和研究。从分析结果来看,eID在功耗、读写速度、安全性、抗干扰等方面具有一定的优势,更适合于新建场景采

加了采集标签信息、存储和上传标签信息、监控端口状态以及端口定位指引等智能化功能。智能光纤网络设备支持与智能管理终端、智能光纤网络管理系统等通信,可通过连接稳定的交流或直流电源处于长时供电状态或由智能管理终端向其短时供电。

智能管理终端是一种便携式设备,主要通过与智能光纤网络设备、智能光纤网络管理系统之间的交互完成智能光纤网络设备的接入管理功能和现场施工管理功能。对于不支持实时供电的智能光纤网络设备,智能管理终端可提供供电服务。

智能光纤网络管理系统主要实现对智能光纤网络设备的管理功能,包括配置管理功能、资源管理功能、故障管理功能、评估分析管理功能、安全管理功能、拓扑管理功能、系统管理功能等。智能光纤网络管理系统可以直接管理智能光纤网络设备,也可以通过智能管理终端对智能光纤网络设备进行管理。

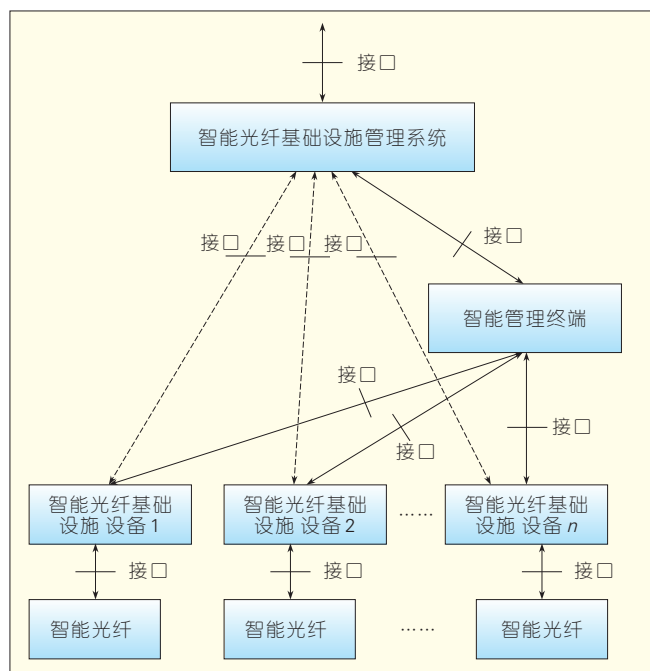


图2 智能光纤基础设施管理系统架构

络管理系统、智能管理终端、电子标签及智能光纤网络设备等几个主要部分组成,其中电子标签安装于光纤端口上,用于对光纤端口进行标识。智能光纤网络设备端口通过读取光纤端口上的电子标签建立设备端口和光纤端口的连接信息,智能管理终端提供管理操作界面,主要完成智能光纤网络设备的接入管理功能和现场施工管理功能,智能光纤网络管理系统则实现对智能光纤网络设备的管理。

## 2.2 智能光纤基础设施管理关键技术

智能光纤网络管理系统主要包括电子标签、智能光纤网络设备、智能管理终端、智能光纤网络管理系统等。

电子标签一般以集成电路芯片为存储信息的媒介,记录电子编码信息,分别为接触式电子标签(eID)和非接触式电子标签(RFID)。我们对

用。从理论上讲,RFID不需要读头和天线标签接触即可完成信号的收集,比较容易实现不中断业务的设备升级。接触式电子标签和非接触式电子标签的比较如表1所示。

智能光纤网络设备除了具备传统光配线设备所具有的光纤连接、分配和调度等功能外,最重要的就是增

## 2.3 智能光纤基础设施管理技术应用和发展趋势

全球运营商对智能光纤网络系统的进展高度关注,有超过15家运营商倾向于智能光纤基础设施管理技术。全球标准化组织如BBF、ITU-T、CCSA等都在进行关于智能光纤基础设施的标准制订工作,如ITU-T的

表1 接触式电子标签和非接触式电子标签的比较

特性	接触式电子标签	非接触式电子标签	说明
功耗	典型值为2~6 mW/端口	典型值为13~20 mW/端口	一般智能管理终端对智能光纤设备进行临时供电,需要低功耗的电子标签技术
读写速率	最高读取速率可达125 kbit/s	最高读取速率为26 kbit/s	电子标签信息读取速率显得较为重要,高读取速率可以极大提高运维速度及使用感知
抗干扰能力	接触式读取方式,不易受到电磁干扰	无线传输方式,工作频率为13.56 MHz,易受到外部电磁干扰	外部电磁干扰容易导致读取错误
成本	结构相对简单,成本相对较低	读写器需要外加读取天线和射频识别电路,成本相对较高	—
适用场景	适用新建场景	不需要读头和天线标签接触即可完成信号的收集,比较容易实现不中断业务的设备升级	—
eID: 电子标签    RFID: 射频标签			



L.64、L.69、L.80、BBF WT-311等。整体上,全球的智能光纤基础设施管理技术标准处于快速完善中,预计1~2年内就可以形成完善的标准体系。一些ODN厂商推出了智能光纤基础设施管理系统产品,并在一些运营商的现网进行试验。但智能光纤基础设施管理技术还需要解决如下技术问题:

(1)从目前的实际情况来看,现网光纤基础设施建设占FTTX网络建设投资的50%以上,而且光纤网络基础设施具有建设周期长、在网时间长和敷设后难调整的特点。因此,对传统光纤网络基础设施的改造是目前需要解决的关键问题,特别是如何降低在ODN智能化改造过程中的业务中断时间、如何降低改造成本、如何保证智能光纤网络设备的端口密度不因智能化改造而降低。

(2)智能光纤网络系统最终要融入包括综合资源系统、综合服务保障系统以及光链路测量和诊断系统等组成的OSS体系架构中。需要建立智能光纤基础设施管理系统与上述系统的接口的数据模型和标准。

### 3 PON终端的零配置开通

传统的DSL接入网终端相对比较简单,Modem可以即插即用。但PON终端相对比较复杂,特别是支持三重播放(Triple-play)应用的家庭网关的引入,其开通涉及PON网络、终端管理平台(ITMS)和IPTV、VoIP、上网等多个业务平台,终端的放装流程更加复杂,需要通过流程创新和完善的支撑系统来提高放装速度。所谓“零配置”就是尽量减少用户或者现场安装维护人员对终端的操作,通过创新的终端认证方式和自动化的业务激活流程,降低PON终端安装维护时的人工操作,提高安装维护效率。

原有的基于物理标识(媒体访问控制(MAC)地址或者SN)的光网络单元(ONU)认证方式无法实现PON网络、业务与管理平台的预配置,终

端安装过程中需要线务员进行大量的现场手工配置和后台运维人员的配合。采用基于逻辑标识(即与客户帐号唯一对应的标识)的ONU认证可以实现PON终端的零配置装维流程。逻辑标识实现了设备的物理标识和用户帐号的解耦,可以在PON ONU未下发(其物理标识也未知)的情况下,实现逻辑标识与用户的配置信息的关联,从而实现预配置<sup>[1, 6~7]</sup>。典型情况下采用基于逻辑标识的ONU认证的PON上行家庭网关的零配置安装流程如图3所示。

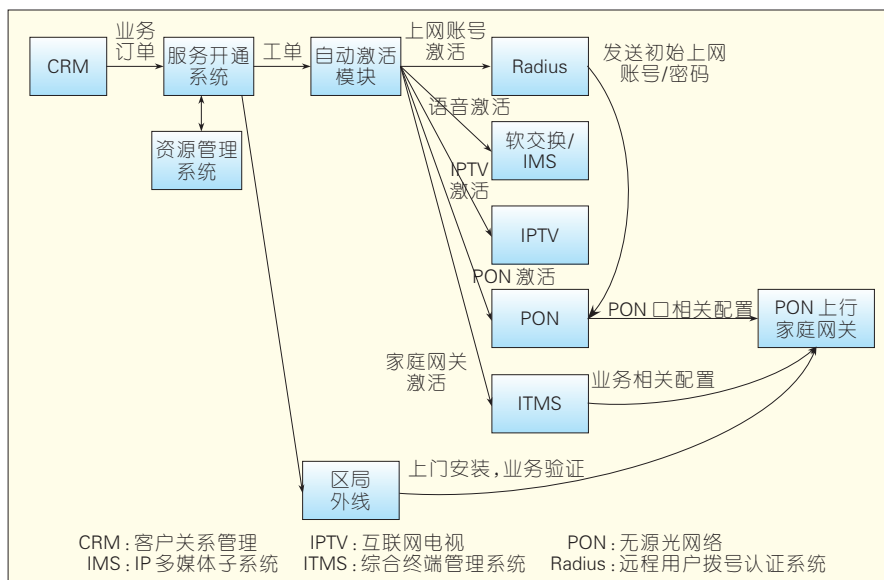
营帐系统在受理业务开通时为客户提供逻辑标识(LOID)和密码,实现了终端物理设备和客户帐号的分离,并通过自动激活模块完成该帐号在PON光线路终端(OLT)、终端管理系统(ITMS)、AAA、IPTV、VoIP等业务系统上相关属性的预配置。领取ONU后,用户或者线务员登录ONU的本地设备管理界面输入LOID和密码,ONU就会在注册时通过逻辑标识认证流程将逻辑标识和密码上传到OLT和ITMS进行认证,然后OLT和ITMS即把预配置的PON口相关属性和业务属性通过OAM/OMCI或TR-69协议自动下发给ONU。整个ONU的安装过程不需要网管后台人员的

参与,使得ONU安装速度从小时级降低到分钟级,出错概率大大降低,显著提升了装维效率。

随着大规模的FTTH网络建设,为了进一步降低ONU终端营销成本,ONU社会化已经成为运营商关注的重点。为了实现ONU社会化,需要进一步提高终端安装的简便性,机卡分离型ONU成为运营商进一步提高装维效率、免除人工操作的一种有效手段。机卡分离型ONU借鉴了移动终端采用用户识别模块(SIM/UIM)卡认证的优点,通过专用的SIM卡承担ONU认证的功能。目前,机卡分离型ONU的技术规范和装维方案均已基本确定<sup>[7]</sup>,未来几年,机卡分离型ONU将得到广泛的应用。

### 4 PON系统的光链路测量与诊断

PON网络的服务保障系统的核心功能之一是在发生申告或故障后快速进行故障定位与修复以及进行定期的网络性能监测。PON网络的光链路故障主要涉及OLT与ONU的光模块以及ODN,特别是由无源器件构成的ODN的故障更加难以定位和修复,是PON网络运行、管理和维护的重点和难点<sup>[8]</sup>。



▲图3 实现PON终端零配置安装流程



光链路测量与诊断系统通过对PON系统的光层故障的测量和性能监测实现快速发现和定位光链路故障。目前来看,光链路测量与诊断主要依靠光参数测量和光时域反射两种技术,其光链路测量与诊断系统的功能构成如图4所示。



图4  
光链路测量与诊断系统的功能构成

其中,基于光参数测量(OPM)的方式又被称为光链路检测(OLM)。基于OLM/OPM的光链路测量与诊断主要是利用OLT和ONU的光模块对发送光功率、接收光功率等相关参数的测量,由PON网管对双端光模块的测量结果进行分析实现对光链路的测量与故障诊断功能。这种技术可以比较有效地定位光链路故障的段落,基本能够满足ODN运维的需求,且技术成熟、成本低,已经得到广泛应用且效果良好。

另一方面,OTDR也被普遍认为是精确定位ODN故障、监测ODN性能的有效手段。OTDR主要是通过探测光脉冲在光纤中传输时的瑞利散射和菲涅尔反射所产生的背向散射测量光纤上的反射和衰减事件,并通过回波延迟进行故障定位,从而实现对光线路质量的测试和故障诊断。利用OTDR技术,可以在光线路的一端即可对整个光线路的性能和损伤事件进行测量,且故障定位的准确度很高。由于PON采用树状分支结构,所以OTDR的回波信号受到同一个PON口下其他分支光纤背向散射信号的叠加效应影响,对OTDR的灵敏度、动态范围、分辨率等性能提出了

更高的要求<sup>[9-10]</sup>。目前典型的光链路测量与诊断系统实现方式包括为PON系统外置OTDR、集成在OLT的板卡式OTDR和OLT光模块内置OTDR等3种。其中,前两种均利用现有的OTDR技术,比较成熟,但由于需要引入高成本的光开关设备,成

中分支光纤上的衰减事件,OTDR检测的难度很大,而且分光比越大,分支光纤上的衰减事件越难以检测。我们研究了OTDR检测PON系统中分支光纤上的衰减事件的机理,得出如下公式:

$$\Delta Y = Y_A - Y_B = 5 \lg(N/(N-1) + 10^{-X/5}) \quad (1)$$

其中, $X$ 为PON系统中分支光纤上的衰减事件强度(单位为dB), $\Delta Y$ 为对应于该衰减时间在OTDR的反射曲线上反映的信号衰减幅度(单位为dB), $N$ 为分光比。表2给出了在不同分光比下分支光纤衰减强度与OTDR曲线的可观测到的衰减强度之间关系的理论分析和实际测试结果。

考虑到噪声等其他因素的影响,对于1:32以及更大分光比的PON系统,衰减的幅度降低2个数量级,利用传统OTDR技术检测分支光纤上的衰减时间是不可能的。为了解决OTDR无法检测分支光纤上的衰减事件的问题,业界提出了在ONU侧安装一个无源的波长选择性的反射器,通过检测这个反射器反射回来的光脉冲的强度就可以精确的计算出从OLT到ONU的光链路的衰减,并通过与历史数据进行比对,从而判断某个

表2 典型配置下的分支光纤衰减强度与OTDR曲线的可观测到的衰减强度之间的关系

分光比	某一支光纤上发生的衰减事件的强度/dB	计算得到的OTDR测试曲线上的可观测到的衰减强度/dB	试验观察到的OTDR测试曲线上的可观测到的衰减强度/dB
4	5	0.553 5	0.567/0.52 <sup>注1</sup>
	3	0.450 1	0.449/0.27 <sup>注2</sup>
	1	0.210 2	无法测得 <sup>注3</sup>
16	5	0.125 7	无法测得 <sup>注3</sup>
	3	0.104 1	无法测得 <sup>注3</sup>
	1	0.050 7	无法测得 <sup>注3</sup>
32	5	0.061 9	无法测得 <sup>注3</sup>
	3	0.051 4	无法测得 <sup>注3</sup>
	1	0.005 0	无法测得 <sup>注3</sup>

OTDR:光时域反射仪

注1:采用EXFO公司商用OTDR在1 625 nm(10 ns脉宽)波长测试得到数据为0.567 dB,采用EXFO公司商用OTDR在1 550 nm波长(30 ns脉宽)测到数据为0.52 dB

注2:采用EXFO公司商用OTDR在1 625 nm波长(10 ns脉宽)测试得到数据为0.449 dB,采用EXFO公司商用OTDR在1 550 nm波长(30 ns脉宽)测试得到数据为0.27 dB(由于1 550 nm波长对弯曲事件没有1 625 nm波长敏感,测试值比理论值偏小)

注3:超过了EXFO公司商用OTDR的检测灵敏度,无法分辨出衰减事件

分支是否存在衰减事件<sup>[11-12]</sup>。这在很大程度上解决了分支光纤的衰减事件无法检测的难题,也有利于降低对于OLT光模块内置OTDR的检测性能要求。由于成本和安装管控等方面的考虑,我们提出了ONU内置介质膜反射器的实现方案及其技术指标要求并获得了业界的广泛支持<sup>[13-15]</sup>。基于OLT光模块内置OTDR和ONU内置介质膜反射器的方案将成为下一阶段研发的重点,并有希望在1~2年内实现一定规模的商用。

## 5 结束语

PON网络的运行、管理和维护包括综合资源管理、服务开通、综合服务保障等多个方面,并涉及光纤接入网、软交换、IPTV、终端远程管理系统(ITMS/BBMS)、AAA等多个网络和业务系统,在系统架构与实现、业务流程、交互接口等方面具有前所未有的复杂性。目前,业界对于PON网络运行、管理和维护技术研究的重点在于智能光纤基础设施管理、终端装维的“零配置”、光链路测量与诊断等方面。相关技术处于快速发展阶段,相信在未来1~2年内,这些技术将进

入规模商用阶段,进而推动运营商PON网络运维能力的提升。

### 参考文献

- [1] 中国电信. 中国电信PON EMS北向接口功能及技术规范[S]. 中国电信, 2012.
- [2] ITU-T. ITU-T L.66. Optical fibre cable maintenance criteria for in-service fibre testing in access networks[S]. ITU-T, 2010.
- [3] ITU-T. ITU-T L.69. Personal digital assistant requirements and relevant data structure for infrastructure and network elements management[S]. ITU-T, 2010.
- [4] ITU-T. ITU-T L.80. Operations support system requirements for infrastructure and network elements management using ID technology[S]. ITU-T, 2011.
- [5] SHEN C B. iODN Standardization Progress[R]. FTTH CAP, 2012.
- [6] 中国电信. 中国电信EPON设备技术要求[S]. 中国电信, 2009.
- [7] 中国电信. 中国电信机卡分离型家庭网关设备技术要求[S]. 中国电信, 2005.
- [8] SHEN C B, JIANG M. General Requirements for Optical Layer Management in PON system[R]. CBF, 2012.
- [9] RICHARD G. OTDR Overview[R]. CBF, 2012.
- [10] An Innovative Solution for In-service Trouble-shooting on Live FTTH networks[EB/OL]. [2014-07-01]. <http://documents.exfo.com/appnotes/anote130-ang.pdf>.
- [11] ITU-T. ITU-T L.53. Optical fibre maintenance criteria for access networks[S]. ITU-T, 2012.
- [12] BBF. BBF WT-287. PON Optical Layer Management[S]. BBF, 2012.
- [13] 张维华. 城市光网[IM]. 北京:人民邮电出版社, 2014.
- [14] 沈成彬, 杜喆, 蒋铭, 王波. 反射器在FTTX网

络的OTDR测试与诊断中的应用研究[J]. 电信科学, 2014,4(11):123-128.

- [15] SHEN C B, WANG B, LOWELL L. Discussion on OTDR test wavelength range in OLM system[R]. CBF, 2012.

### 作者简介



**沈成彬**, 上海交通大学博士毕业; 中国电信上海研究院技术总监、教授级高工; 从事宽带光接入与传输技术及其应用研究, 研究重点包括PON及ODN、光链路测量与诊断、下一代互联网、WLAN等; 已主导制订了6项BBF、IEEE、ITU-T、CCSA标准; 已发表学术论文20余篇。



**蒋铭**, 上海交通大学博士毕业; 中国电信股份有限公司上海研究院基础网络部接入室主任、高级工程师, FSAN NG-PON2 IOP和G.989.3组的Co-editor; 从事光纤接入网的技术研究工作; 已主导制订了2项ITU-T、CCSA标准; 已发表学术论文10余篇。



**王波**, 清华大学硕士毕业; 中国电信集团公司技术部业务经理、高级工程师, CCSA TC6 WG2副主席; 从事宽带技术研究与技术管理, 研究重点包括PON、DSL、光链路测量与诊断、WLAN、网络智能化等; 已发表学术论文6篇。

## 综合信息

### 中国物联网产业年复合增长率超30% 空间巨大

2014年9月11日消息, 目前物联网被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展第3次浪潮, 已经成为世界各国抢占未来科技制高点的重要领域。

“近些年, 中国物联网发展已经进入一个快速发展期。”工业和信息化部副部长毛伟明在参加无锡国家传感网创新示范区部际建设协调领导小组第3次会议期间说。

据了解, 经过多年的发展, 中国物联网产业规模已经从2009年的1700多亿元增长到2013年的5000多亿元, 年复合增长率超过30%。

伴随着产业规模的快速扩大, 中国物联网产业体系日趋完善, 集聚发展态势明显。据毛伟明介绍, 目前中国已经初步形成了覆盖芯片和元器件、设备、软件、系

统集成、电信运营、物联网服务在内的较为完整的产业链。形成了长三角、珠三角、环渤海和中西部四大物联网产业聚集发展区, 在无锡、重庆、杭州建立了3个国家级物联网产业示范基地。

宏观层面来看, 新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化, 以及现代服务业发展等将为中国物联网的快速发展提供广阔的市场空间。毛伟明认为, 未来中国物联网将在两大领域率先获得突破性的进展, 一是关系国民经济和社会发展、民生服务、国家安全的重要领域; 二是具有良好用户基础和市场发展潜力的领域, 如工业控制、物流追溯、车联网、医疗健康管理等领域均具备率先发展的基础条件。但从目前来看, 中国物联网关键技术与其他国家水平还有不小差距。

(转载自《中国信息产业网》)

# 下一代无源光网络节能关键技术

## Key Technologies of Power-Saving for Next-Generation Passive Optical Network

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0023-06

**摘要:** 从网络分层、接入网设备以及新型网络架构3个角度对下一代无源光网络(NG-PON)的节能技术进行分析研究。基于NG-PON的标准工作和节能关键技术,提出了基于网络编码(NC)的NG-PON节能调度机制,实现了不同节能技术之间的综合应用,并在提高节能效率的同时有效提升了网络性能。研究表明不同的NG-PON节能技术既有其各自独立优势和特点,同时也具有交叉和关联性,从而可以以较为综合的方式运用节能技术以降低NG-PON中的能源消耗。

**关键词:** 下一代无源光网络; 标准化; 节能; 混合调度机制

**Abstract:** In this paper, we analyze key power-saving technologies from the perspective of network hierarchy, access network equipment, and novel network architecture. Based on the above standard and the key technologies of power-saving, we propose a green scheduling mechanism based on network coding in a NG-PON. This mechanism combines various power-saving technologies, improves energy efficiency, and improves network performance. The paper discusses how power-saving technologies are dependent on each other. Interrelations and organic connections of those technologies can provide a flexible, comprehensive way of implementing power-saving technologies.

**Keywords:** next-generation passive optical network; standardization; power-saving; hybrid scheduling mechanism

赵继军/ZHAO Jijun

冯楠/FENG Nan

任丹萍/REN Danping

(河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038)

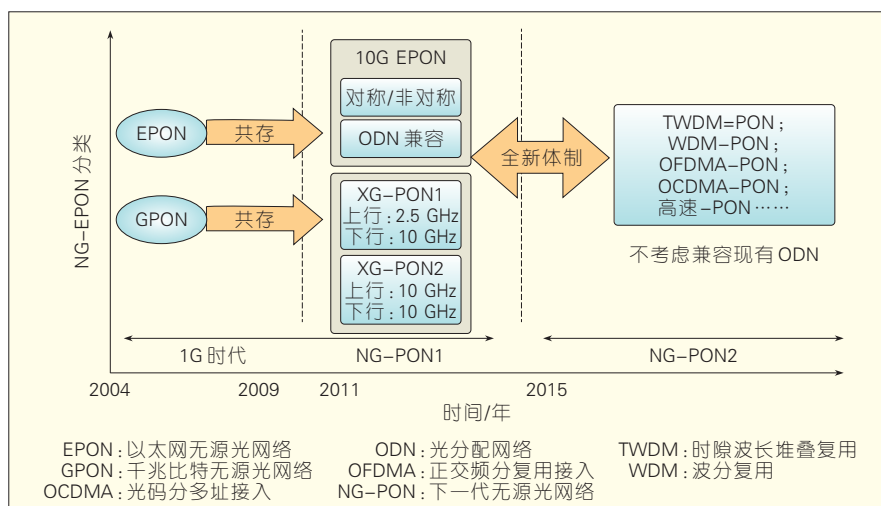
(School of Information and Electric Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

EPON 和 XG-PON 为代表的 NG-PON1, 以及具有长期演进趋势的以时隙波长堆叠复用无源光网络(TWDM-PON)、波分复用接入无源光网络(WDM-PON)、正交频分复用接入无源光网络(OFDMA-PON)、光码分多址接入无源光网络(OCDMA-PON)等更高速的 PON 技术为代表的 NG-PON2<sup>[1]</sup>。

在 NG-PON 技术发展的同时, 由于能源危机、温室效应和环境污染等全球性问题日益突出, 节能降耗已经成为社会和经济发展的普遍共识。

在各种接入网技术中, 无源光网络(PON)被认为是最有前景的宽带接入技术, 并在近几年迅猛发展。但大量新型业务的出现, 如IPTV、HDTV、视频会议等, 使得用户对带宽的需求进一步提高, 极大地促进了PON向更高传输速率、更长传输距离和更大分光比的方向快速发展, 下一代无源光网络(NG-PON)在此背景下应运而生。NG-PON的演进趋势

如图1所示, 可分为以演进中的10G



收稿日期: 2014-07-23

网络出版时间: 2014-08-21

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(F2014402075); 河北省教育厅科学研究计划重点项目(ZH2012020); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN20131064)



在这一背景之下,基于绿色网络的电信网络节能技术也成为业界关注的热点。而PON网络的广泛部署以及巨大的用户端设备规模,使得接入网络的能源消耗占整个电信网络70%以上<sup>[2]</sup>。因此,降低接入网络能耗,将可以有效降低整个电信网络的运行能耗。因此,NG-PON的节能技术也日渐受到标准化组织、学术界以及工业界等的广泛关注。

## 1 下一代无源光网络节能技术标准化现状

目前,NG-PON节能技术的标准化进程正在稳步推进。面向节能的NG-PON标准化组织主要包括IEEE和ITU-T两大国际标准化组织。他们在演进的EPON、节能以太网、GPON以及TWDM-PON这些网络的标准化工作中关注了节能技术,具体的标准化进程如图2所示。

在IEEE方面,IEEE 802.3工作组在IEEE 802.3av建议中提出了EPON的低功率模式,并于2013年公布了IEEE P1904.1,即服务互操作性以太网无源光网络(SIEPON)<sup>[3]</sup>标准。SIEPON作为EPON的系统标准,规范并定义了EPON以及10G EPON中发射机(Tx)和收发机(TRx)两种节能模式,并确定了“光线路终端(OLT)主导”和“OLT与光网络单元(ONU)联合控制”两种能源节省机制。此外,IEEE 802.3工作组还对节能以太网(EEE)进行了标准化<sup>[4]</sup>,其基本思想是当发送/接收空闲帧时,低功率空闲(LPI)抑制了物理层(PHY)在发送/接收过程中的能源消耗,这大大减少了包括1000BASE-T和10G BASE-T在内的不同类型的以太网接口能源消耗。

在ITU-T方面,早在2006年3月,ITU-T就已开始进行GPON节能问题的标准化研究工作,并在

2009年颁布了ITU-T系列的G.sup45“GPON能源节省”标准。在G.sup45中规范了基于用户网络接口(UNI)的ONU电源限制机制、基于PON口令的ONU假寐机制,以及快速休眠模式和深度休眠模式。在ITU-T标准G.987.3中则指出了XG-PON相应的节能模式以及各节能模式在实际过程中的状态转移。此外,ITU-T在2013年还发布了面向NG-PON2的ITU-T G.989.1标准。标准规范了对40 Gbit/s TWDM-PON设计的总体要求,作为一个整体的功能参考架构,G.989.1为不同节能方案的实施提供了一定的空间。作为TWDM-PON的传输汇聚层标准,G.989.3草案则具体规范了节能模式以及状态转换。其中,OLT利用管理控制接口(OCMI)来发现ONU的能源管理能力以及配置能源管理的属性和模式。并且ONU和OLT中均具有能源管理状态转换机制。ITU-T拟在2015年完成关于NG-PON2的G.989系列标准<sup>[5]</sup>。关于未来NG-PON的标准化发展趋势,在后NG-PON2即NG-PON3中则主要集中在WDM-PON和OFDMA-PON等相关标准的计划与制订之中。

此外,ITU-T在2013年公布了一个新的建议版本G.epon。比较而言,ITU-T的G.epon与IEEE的SIEPON的用户数据相同,在介质访问控制(MAC)的客户端扩展的控制方面与

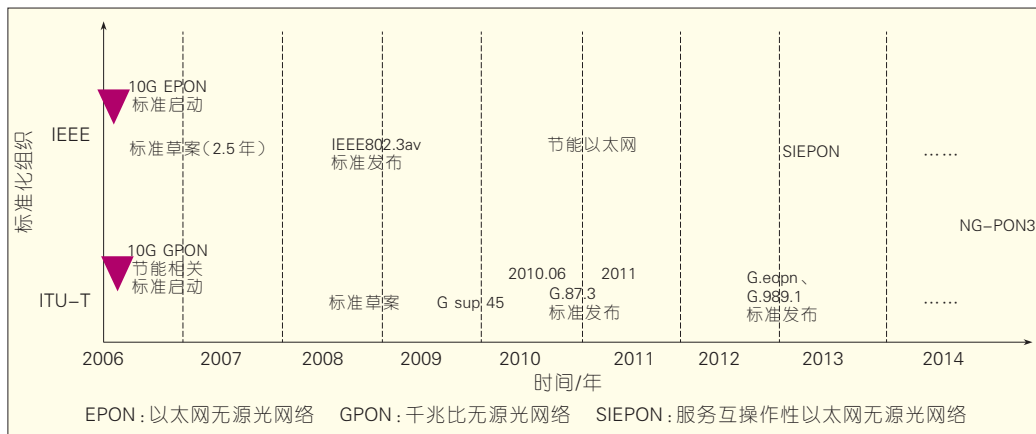
SIEPON也没有区别,只是在网络管理方面,基于SIEPON的“Package”增加了ONU的OMCI。

## 2 下一代无源光网络节能关键技术

依据上述标准所规范的整体需求、节能模式和节能机制,目前全球学者从不同角度对NG-PON的节能技术展开了研究。其中,研究工作主要集中在如下几个大的方面,从网络层面角度来看,NG-PON的节能技术可以分为硬件节能技术和软件节能技术,其中硬件节能技术又称为物理层节能技术,软件节能技术又称为数据链路层节能技术;从接入网的设备角度来看,又可分为OLT端节能技术和ONU端节能技术;此外,还包括从新型网络架构方面来考虑的节能技术。当然,依据这些角度所进行划分的节能技术并不是相互独立的,而是相互交叉,有机的联系在一起,从而可以以较为综合的方式构建节能技术方案,降低NG-PON中的能源消耗。本文中按照上述分类标准划分的NG-PON节能技术如表1所示。

### 2.1 面向网络分层的节能技术

面向网络分层的节能技术主要包括硬件节能和软件节能技术。在网络物理层面,主要依赖硬件能效提升关键技术,其利用大规模集成电路(LSI)的良好信息处理能力,高速串



▲图2 NG-PON节能的标准化进程

口电路的改进以及高效的供电器件效率来设计低功耗光端机,以降低网络设备能耗。在 MAC 层面则依赖软件节能技术,它主要针对 PON 网络的数据链路层,一般通过在 MAC 层引入标准里所规范的 ONU 休眠模式,从而开启或关闭特定的功能模块来控制设备的能源消耗以实现节能。

#### (1) 硬件节能技术

目前,针对 NG-PON 物理层面的硬件节能技术主要是针对特定的网络利用先进的器件和大规模集成电路 (LSI) 技术对光端机等设备进行创新型设计。其中,新的设备架构可以在多种模式或特定的功能状态下支持节能。Wong<sup>[6]</sup>等人提出了 4 种新的绿色 ONU 架构 (GR-ONU1-4),并分别就工作、休眠、半休眠状态下的能耗以及时间开销方面与标准的 ONU 架构进行了比较研究,研究表明 GR-ONU-2 架构以其非常短的开销时间

和稍高的能源消耗性能最好。而对于 OFDMA-PON,由于其依赖于数字信号处理器 (DSP) 所进行的离散快速傅里叶变换 (IFFT)、快速傅里叶变换 (FFT)、以及高速模数及数模转换,这些处理器件都产生了较高的能源消耗,因此,Vetter<sup>[7]</sup>等人提出采用一个带通滤波器来选择一系列合适的连续子载波。这样通过 FFT 来处理后的模数转换器 (ADC) 的采样数将减少 1/4,ONU 则不需要处理整个频谱从而减少了信息处理过程中的能耗,从而实现了节能。Scherenk<sup>[8]</sup>等人提出了一种基于光噪声重用的节能方案,该方案通过将接入网络中的光放大器所产生的自发辐射噪声 (ASE) 作为自然泵浦源送入光分配单元中的掺铒光纤 (EDF) 进行光信号的放大,这一方案巧妙地利用网络中的光放大器噪声功率这一“副产品”实现了 ONU 中的半导体光放大

器 (SOA) “重用”,该方案只是通过将光噪声循环使用,就使得接入网络在没有增加额外能源开销的情况下,增加了服务的客户数,从而有效提升了网络的能源使用效率。

#### (2) 软件节能技术

目前,针对 NG-PON 的 MAC 层面软件节能技术主要通过在传输汇聚层 (TC)/MAC 层设计 ONU 休眠节能控制机制、新型节能协议,如比特交织协议以及自适应链路控制机制等,从而来实现休眠节能的目的。其中,通过业务流的优化和调度来实现 ONU 的休眠控制是最常见的一种方式。ONU 休眠节能的基本思想是当业务流量低时将 ONU 处于相应的节能模式,现已出现多种经典的 ONU 休眠控制机制,如:上行中心调度机制 (UCS)、下行中心调度机制 (DCS)、实时休眠控制 (Just-in-time)、动态 ONU 节能以及能耗感知的 MAC 协议等。值得注意的是,一般将上述 ONU 休眠机制与 NG-PON 中不同网络结构中的动态绿色资源分配算法结合,从而在实现节能的同时保证网络性能。Kubo 等人为了允许 1 Gbit/s 和 10 Gbit/s 的 ONU 可以在一个 PON 中共存,在一个不对称的 10G EPON 的 ONU 中同时使用 1 Gbit/s 和 10 Gbit/s 的接收机<sup>[9]</sup>,并提出根据实际的业务情况通过 PHY 的接口转换将工作链路在 1 Gbit/s 和 10 Gbit/s 之间进行转换,这种方式在业务较少时减少了 ONU 的能源消耗。随着 NG-PON 中高速 TDM-PON 的发展,在具有多个不同链路速率的 PON 中,如何灵活地进行速率的转换和控制是亟待解决的问题。Van 等人通过研究比特交织 PON (BiPON)<sup>[10]</sup>,提出了一种利用比特交织协议进行 PON 节能的思路。它允许所有汇聚后到达的数据帧在时钟和数据恢复 (CDR) 后逐比特地发向 ONU,并通过一个简单的限幅器在 ONU 的接收端提取选择 ONU 的相应比特。BiPON 降低了对时钟速度、数据处理、电压以及内存的需求,因

▼表 1 NG-PON 主要节能技术分类

分类依据	关键技术
面向网络分层节能技术	硬件节能技术(物理层) 新的 OLT、ONU 节能结构,光噪声重用 经典的 ONU 休眠控制机制: UCS、DCS、MAC 感知能耗协议等
	软件节能技术 (MAC 层) 动态绿色资源分配算法(带宽和波长等) 链路速率自适应控制机制 比特交织无源光网络 (BiPON)
面向接入设备节能技术	OLT 端节能技术 利用以太网汇聚器 (EA) 进行链路的业务汇聚 各种 NG-PON 中的网络编码技术 TWDM-PON 利用波长转换开关 (WSS) 实现 OLT 休眠 各 ONU 共享波长
	ONU 端节能技术 ONU 电源限制、休眠、快速/深度休眠、Tx/TRx 模式 动态绿色资源分配算法(带宽和波长等)
面向新型网络架构节能技术	面向 TDM-PON 的 NC-SIEPON 架构 TWDM-PON 中利用波长转换开关 (WSS) 的架构 WDM-PON 中 PSMC 架构实现共享波长 能源有效的 WDM/OFDMA PON 系统 (NEWOPS) 基于软件定义网络 (SDN) 的节能 NG-PON
BiPON: 比特交织无源光网络 DCS: 下行中心调度机制 EA: 以太网汇聚器 MAC: 介质访问控制 NEWOPS: 能源与开销有效的 WDM/OFDMA PON 系统 NG-PON: 下一代无源光网络	OFDMA: 正交频分复用接入 OLT: 光线路终端 ONU: 光网络单元 PSMC: 嵌入式的节能模式控制器 SDN: 软件定义网络 SIPON: 服务互操作性
	以太网无源光网络 Tx/TRx: 发射机/收发机 TDM: 时分复用 TWDM: 时隙波长堆叠复用 UCS: 上行中心调度机制 WSS: 波长转换开关

此其运行装置可以工作在低速的情况下,从而大大减少了高速设备的能源消耗。研究结论显示,BiPON可使网络结构的功耗获得显著降低。

## 2.2 面向接入网络设备的节能技术

在 NG-PON 中,OLT 作为 PON 系统的控制中心位于中心局端,ONU 位于用户端,每一个 OLT 通过 TC 层协议控制多个 ONU。因此,从接入网设备的角度来说,PON 节能机制可以分为 OLT 端的节能以及 ONU 端的节能。

### (1) OLT 端节能技术

对于网络运营商而言,减少 OLT 的能源消耗可以大大减少中心局端的能源消耗。IEEE 802.3az 标准所定义的 EEE 可适用于 OLT-以太网汇聚器(EA)链路以及 EA 中间的骨干网设备。在 NG-PON 中,OLT 和 EA 都将会升级到 10 Gbit/s 及以上。EA 可运行在能源感知模式中,当业务负载低于设定的门限值时,部分 EA 设备进入休眠,从而减少了 OLT 的能源消耗。Kani 等人研究了 OLT 的以太网汇聚器功能<sup>[11]</sup>。通常在 PON 系统的 SNI 端应用链路汇聚(IEEE Std802.3ad),通过利用汇聚链路两端的额外消息来执行标准的链路汇聚机制,并以此控制开启的链路数目。此外,OLT 作为系统的控制中心,一般不能整体关闭,但是,刘心教授等人将网络编码技术引入到 NG-PON 中<sup>[12]</sup>,对数据在 OLT 处的异或编码操作和在 ONU 处的解码操作,并结合下行带宽预留机制实现了协同调度 ONU 的休眠控制,研究结果表明网络编码能够有效地减少下行方向上数据包的数目,减少端到端延迟,有效提高网络性能。而在 NG-PON2 的主流技术 TWDM-PON 中,OLT 和 ONU 中不同类型的可调谐收发机以及 OLT 中波长转换开关(WSS)的使用,使得每一个波长可调谐的 ONU 可以通过改变发射波长来选择 OLT 端口进行接入,并使用 WSS 路由不同的波长到不同的端口,从而

可以实现 OLT 的选择性休眠。Dixit 等人在 TWDM-PON 的 OLT 中,根据业务的负载来配置 OLT 所开启的线卡的数目<sup>[13]</sup>。当网络处于低负载状态时,通过配置光开关,使所有的 ONU 与一个 OLT 线卡来通信,其他 OLT 的线卡可以关闭以节省能源消耗。此外,当业务负载较少时,ONU 可以共享波长。因此一些光发射/接收机和后端的处理器件可以关闭,这些成组的 ONU 可以共享一个波长的容量,从而实现节能。

### (2) ONU 端节能技术

由于 NG-PON 结构中 ONU 的数目远远大于 OLT,ONU 的能源消耗占整个 PON 网络能耗的大部分,因此,从 ONU 设备的角度降低能源消耗具有重要的研究意义。只要硬件支持并遵循上述 ITU-T 和 IEEE 标准所规范的 ONU 节能模式,在 NG-PON 的任意一种网络架构中均可实现 ONU 设备的休眠。Dhaini 等人扩展了 UCS 机制<sup>[14]</sup>,并研究了一种绿色带宽分配算法,该算法在控制延迟的前提下可进行批处理传输模式,保证了 ONU 可以休眠较长的时间。NG-PON 中的各种 ONU 休眠控制机制以及绿色带宽分配算法的实现过程主要围绕 ONU 何时休眠,休眠时间间隔来进行。在 NG-PON2 中,ONU 休眠节能模式还可以与波长分配算法以及频谱选择算法结合起来,通过资源的有效分配和调度,在提高节能效率的同时保证网络的性能。

## 2.3 面向新型网络架构的节能技术

NG-PON 中不同的网络技术具有相应的网络结构,不同的网络结构和形态对节能有不同的影响。因此,新型网络结构的设计对于节能技术的实施具有十分重要的影响。需要注意的是,不同网络结构的设计既要获得物理层的硬件支持,又需要有逻辑上的互联互通,它融合了网络在各层面的节能技术。

Das 等人为了降低能源消耗,采

用 WSS 作为关键器件提出了一个新型的 TWDM-PON 架构,并依据该结构提出了一种基于最优化用户分组的能源节省机制以最小化波长利用率<sup>[15]</sup>,即由数据速率以及 OLT 与 ONU 之间的距离来决定可以分组在一个波长上的 ONU 数目。当 ONU 所提供的负载小时,多个相邻的 ONU 可以共用一个单独的波长,随着负载的增加,当这一个波长不能满足为所分组的 ONU 提供服务时,则可以再分配一个额外的波长。Wang 等人提出了一种新型的 WDM-PON 架构,并在此架构中提出一种智能的动态波长共享方法来实现 WDM-PON 中的能源管理<sup>[16]</sup>。在负载高峰期内,处于忙碌状态的 ONU 具有特定的下行/上行波长,但在非高峰期时,ONU 具有共享波长能力,因此在 OLT 中可以关闭空闲的光/电线卡来实现大量的能源节省。Lee 等人在一个 10 Gbit/s WDM-PON 架构的 ONU 中采用了一个嵌入式的节能模式控制器(PSMC)<sup>[17]</sup>,该控制器可根据上行业务监测模块进行节能调度。Yuang 等人提出了一种能源与开销有效的 WDM/OFDMA PON 系统——NEWOPS<sup>[18]</sup>,可高效地实现频谱和灵活的子信道带宽分配。在低负载情况下,该混合系统可应用光开关来实现 OLT 中某些频谱选择,从而使其转入休眠模式,而其他的则被不同的 ONU 共享。共享同一波长的 ONU 可利用不同的 OFDM 子载波承载并发送数据。

除了上述 NG-PON 中各个新型网络架构的设计,目前,将软件定义网络(SDN)技术引入到接入网络中,将网络控制与数据转发分离开来也为 NG-PON 的节能技术提供了一种新的思路。值得注意的是,GPON 的 OMCI 接口为将 SDN 引入到 PON 中提供技术途径,目前具有 OMCI 的 EPON 标准 G.epon 也正在逐步推进。基于 SDN 的 NG-PON 可通过对网络架构的创新性设计,并通过对 OpenFlow 协议的扩展以及数据转发层面的流表优化



配置获得更高的网络性能和节能效率。Gu 等人通过软件定义的方式结合 NC 技术设计了一种灵活、节能有效且支持数据中心内部通信的 PON 网络架构<sup>[19]</sup>, 实现了利用软件定义技术根据业务特性进行动态波长分配的尝试, 有效地减少了能源消耗并解决了网络带宽“瓶颈”问题。利用基于 SDN 的新型 NG-PON 网络结构, 通过扩展 OpenFlow 协议且在控制器 (NOX) 实现智能的多等级业务的节能控制, 是基于软定义的 NG-PON 节能技术研究的一个重要内容。

### 3 NG-PON 中基于 NC 的节能调度机制研究

根据对既有节能技术的分析, 论作者依据 EPON 最新标准 SIEPON 中关于节能的相关规范, 对 NG-PON 节能技术进行了研究。结合 NC 与 ONU 休眠节能控制要求, 分别对“OLT 独立主导”以及“OLT 和 ONU 联合控制”两种节能调度机制进行了设计。这两种机制通过时隙管理以及数据包调度的混合调度机制实现 NG-PON 的能源管理。调度机制的基本思想为: 对利用 NC 技术对网络编码包的组播时隙进行管理, 两种节能调度机制都通过扩展的授权 (GATE) 与请求 (REPORT) 控制信息来实现网络传输、NC 的控制与管理。并且 OLT 不直接参与 ONU 休眠模式的切换控制, 而是通过动态带宽分配 (DBA) 算法为 ONU 分配上下行传输时隙来影响 ONU 的休眠时间。基于节能考虑, 下行数据被缓存在 OLT 中按规定的下行时隙发送。OLT 分配好时隙后生成 GATE 帧向 ONU 授权带宽, ONU 在接收 GATE 帧后, 将得到自身的时隙分配情况, 并根据传输时隙安排在指定的时间选择自身最节能的模式进行切换。

图 3 为 OLT 独立主导的单周期内 ONU 休眠节能调度机制工作时序。该机制首先提出了一种 NC-SIEPON 结构在系统级层面实现 NC<sup>[20]</sup>, 从而完

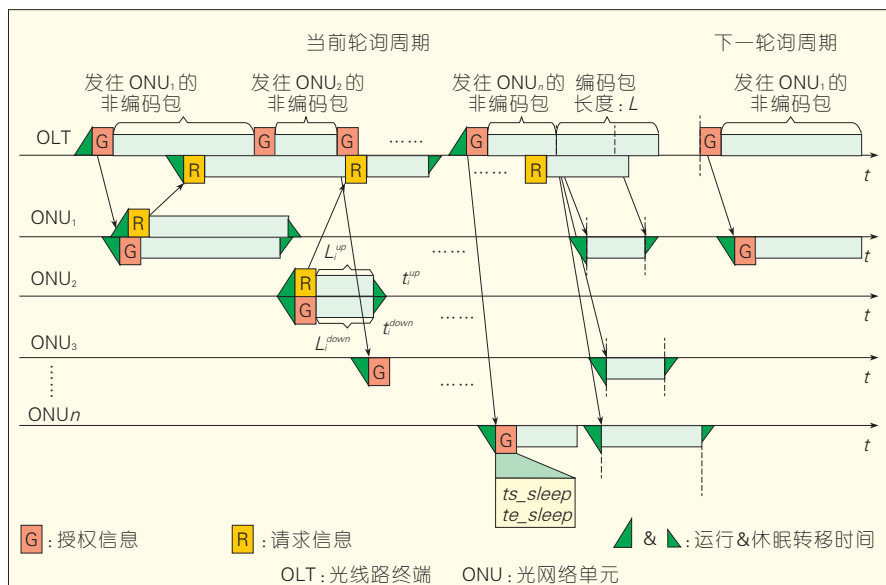
成 OLT 端的节能。并在 OLT 内基于双向业务流量进行时隙分配, OLT 在每一轮询周期的非编码包传输结束后统一发送网络编码包, 并根据前一个周期的 REPORT 帧为当前周期的 ONU 分配上行时隙, 同时, 不断监测当前缓存队列情况, 为下一周期计算传输所需的时间, 因此, 每一个 ONU 所接收到的 GATE 帧中包括了下一周期中 GATE 帧的起始发送时间和下行传输持续时间, 同时分别包含了当前周期的休眠起始时间  $t_{s\_sleep}$  和休眠结束时间  $t_{e\_sleep}$ 。因此, ONU 只在属于自己的时隙接收数据包。该节能调度机制上下行相互独立, 扩展了 SIEPON 中定义的 Tx 和 TRx 休眠模式, OLT 和 ONU 的发射机和接收机可自适应、周期性开启和关闭并最大化了网络编码效益, 有效实现了在 ONU 端的节能。图 4 为 OLT 和 ONU 联合控制的节能调度机制工作时序<sup>[21]</sup>。该机制遵从了 SIEPON 的休眠节能模式, 在每一个轮询周期内, 首先广播 GATE 帧, GATE 帧发送完成以后, OLT 即开始下行广播网络编码包, 剩余的上下行带宽用于非编码包的传输。ONU 分为 Tx 模式、TRx 模式和活跃模式三种工作模式。ONU 根据 GATE 中的授权信息决定各个时隙的

工作模式并找出发射机与接收机的空闲时隙。当空闲时隙长度小于最小休眠时间, ONU 的发射机或接收机模块将退出休眠。各时隙的工作模式确定以后, ONU 建立一个工作状态表来管理接收机与发射机模块以保证工作模式的按时切换。

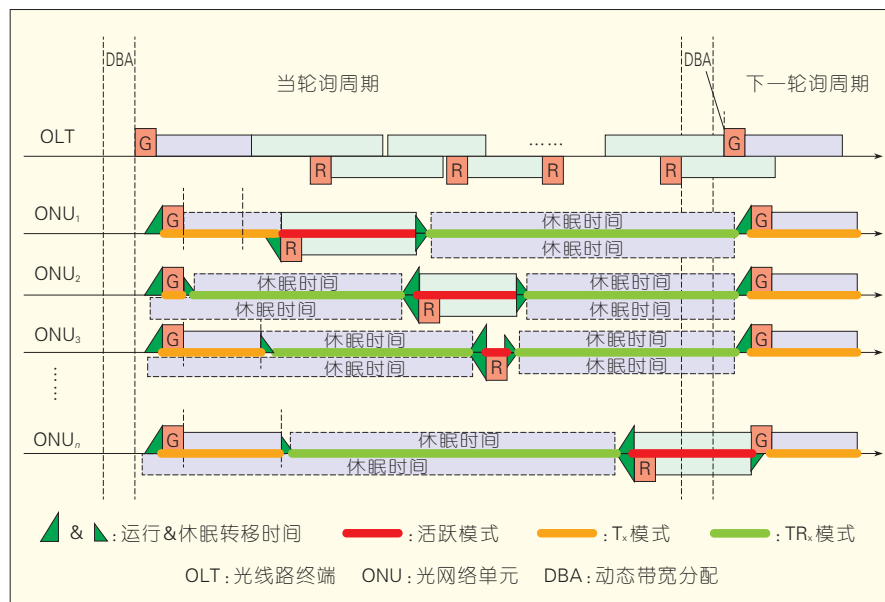
仿真表明, 上述两种混合调度机制考虑了 OLT 端的 NC 节能以及 ONU 端休眠节能, NC 的存在有效提高了网络资源利用率, 基于 ONU 休眠时隙管理的节能调度机制实现了更好的节能效率, 保证了网络的性能。

### 4 结束语

NG-PON 节能技术的研究与实现对于推动绿色网络发展, 降低能源消耗具有非常重要的意义。本文在对当前网络节能技术发展需求进行分析的基础上, 从 NG-PON 节能的标准化现状出发, 分别从网络分层的角度、接入网设备角度以及新型网络架构的角度对 NG-PON 中的关键节能技术进行了较为系统的分析探讨, 并对自己开展的研究工作进行了阐述。通过分析表明 NG-PON 节能技术的发展要注意好如下几方面的统筹兼顾: 一是, 在进行 NG-PON 节能技术研究的同时, 要兼顾能源消耗的



▲ 图 3 OLT 独立主导的 ONU 休眠节能调度机制工作时序



▲ 图4 OLT和ONU联合主导控制的节能调度机制工作时序

减少和网络服务质量的保证,不能顾此失彼,这在进行节能技术方案设计时要统筹兼顾;二是,在NG-PON技能技术的发展和应用过程中,既要考虑各种独立节能技术的优势和特点,同时要考虑不同特点节能技术的综合运用效益,从而实现多种节能技术优势发挥的统筹兼顾;三是,在NG-PON技术的发展过程中,既要关注既有成熟节能技术的完善,同时要考虑和吸收新理论、新器件、新系统以及新的网络结构和形态发展对节能技术的影响,要处理好新旧节能技术在继承创新过程中的统筹兼顾。随着宽带接入技术的发展和“宽带战略”的推进落实,下一代宽带接入技术必将面临新的发展机遇,同时也将面对新的挑战,而基于其的节能技术也必将为各方所更加关注。

#### 参考文献

- [1] MAIER M, NAVID G. FiWi access networks [M]. Cambridge University Press, 2011.
- [2] LANGE C, KOSIANKOWSKI D, GERLACH C, et al. Energy Consumption of Telecommunications Networks [R]. ECOC, 2009.
- [3] IEEE. IEEE P1904.1. Working Group Standard for Service Interoperability in Ethernet Passive Optical Networks (SIEPON) [S]. IEEE, 2012.
- [4] IEEE. IEEE 802.3az. Energy Efficient Ethernet Task [S]. IEEE, 2010.

- [5] ITU-T. ITU-T G.989. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2) [S]. ITU-T, 2013.
- [6] WONG S W, VALCARENGHI L, YEN S H, et al. Sleep mode for energy saving PON: advantages and drawbacks [C]//Proceedings of the GLOBECOM Workshops, 2009 IEEE. IEEE, 2009:1-6.
- [7] VETTER P, SUVAKOVIC D, CHOW H, et al. Energy-efficiency improvements for optical access [J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(4):136-144.
- [8] SCHRENK B, BO F B, BAUWELINCK J, et al. Energy-efficient optical access networks supported by a noise-powered extender box [J]. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal, 2011, 17(2):480-488.
- [9] KUBO R, KANI J, UJIKAWA H, et al. Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(9): 716-729.
- [10] van PRAET C, CHOW H, SUVAKOVIC D, et al. Demonstration of low-power bit-interleaving TDM PON [J]. Optics express, 2012, 20(26):B7-B14.
- [11] KANI J. Power saving techniques and mechanisms for optical access networks systems [J]. Lightwave Technology, Journal, 2013, 31(4):563-570.
- [12] LIU X, FOULI K, KANG R, et al. Network-coding-based energy management for next-generation passive optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(6): 864-875.
- [13] DIXIT A, LANNOO B, DAS G, et al. Flexible TDMA/WDMA passive optical network: Energy efficient next-generation optical access solution. Optical Switching and Networking, 2013, 10(4):491-506.
- [14] DHAINI A R, HO. P H, SHEN. G X, et al. Energy efficiency in TDMA-based next-generation passive optical access networks. Networking, IEEE/ACM, 2013, 22(3):850-863. doi: 10.1109/TNET.2013.2259596.
- [15] DAS G, LANNOO B, DIXIT A, et al. Flexible hybrid WDM/TDM PON architectures using wavelength selective switches [J]. Optical Switching and Networking, 2012, 9(2):156-169.
- [16] WANG R, LEE H H, LEE S S, et al. Energy saving via dynamic wavelength sharing in WDM-PON [C]//Proceedings of the Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2013 17th International Conference on. IEEE, 2013: 235-239.
- [17] LEE H H, KIM K, LEE J, et al. Efficient Power-Saving 10-Gbit/s ONU Using Uplink Usage-Dependent Sleep Mode Control Algorithm in WDM-PON [J]. ETRI Journal, 2013, 35(2): 253-258.
- [18] YUANG M C, HSU D Z, TIEN P L, et al. An energy and cost efficient WDM/OFDMA PON system: design and demonstration [J]. Lightwave Technology Journal, 2013, 31 (16): 2809-2816.
- [19] GU R, JI Y, WEI P, et al. Software defined flexible and efficient passive optical Networks for intra-datacenter communications [J]. Optical Switching and Networking, 2014, 36(5): 213-221.
- [20] ZHAO J, FENG N, LIU X, et al. Implementing Network Coding in Service Interoperability Ethernet Passive Optical Network (IEEE P1904. 1 SIEPON) [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(5): 510-522.
- [21] ZHAO J, BAI W, LIU X, et al. Hybrid scheduling mechanisms for Next-generation Passive Optical Networks based on network coding [J]. Optical Fiber Technology, 2014, 25(1): 151-157.

#### 作者简介



**赵继军**, 北京邮电大学博士毕业, 中兴通讯股份有限公司博士后出站; 河北工程大学教授、硕士生导师; 研究方向为光纤通信与宽带接入、无线传感器网络; 已主持和参加基金项目 10 余项; 已发表学术论文 70 余篇, 其中被 SCI/EI 检索 30 余篇。



**冯楠**, 河北工程大学在读硕士研究生; 研究方向为下一代接入网技术。



**任丹丹**, 北京邮电大学博士毕业; 河北工程大学讲师、硕士生导师; 研究方向为光纤无线混合接入网络; 已发表学术论文 10 篇。

# 环树型 TWDM-PON 动态资源调度方法研究

## Dynamic Resource Scheduling in Ring-Tree TWDM-PON

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0029-005

**摘要:** 针对基于波长变换型远端节点(RN)的环树型时分波分复用无源光网络(TWDM PON)接入网方案,提出了最大带宽利用率算法和最小切换次数算法等两种波长与时隙联合带宽分配算法。仿真结果显示了两种算法的有效性,最大带宽利用率算法可有效提高系统带宽利用率;最小切换次数算法可有效延长系统运行寿命,在现有光开关运行次数条件下系统可保证10年以上的有效运行时间。

**关键词:** 环树型时分波分复用无源光网络;动态波长-时隙带宽分配;混合整数线性规划模型;最小切换次数算法

**Abstract:** In this paper, we introduce a wavelength conversion RN-based ring-tree time and wavelength division multiplexing (TWDM) optical access network (OAN). We also propose a maximum bandwidth utilization rate algorithm and minimum tuning time algorithm. The simulation results show the effectiveness of the two algorithms. The maximum bandwidth utilization rate algorithm improves system bandwidth utilization. The minimum tuning time algorithm prolongs the life of the system, ensuring an effective running time of more than 10 years under existing optical switch running times condition.

**Keywords:** ring-tree TWDM; dynamic wavelength-timeslot bandwidth allocation; mixed integer linear programming; minimum tuning time algorithm

张治国/ZHANG Zhiguo  
胡新天/HU Xintian  
陈雪/CHEN Xue

(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 Lab of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

合时分波分复用无源光网络(TWDM PON)是最具应用前景的光接入解决方案之一<sup>[7-10]</sup>。目前已报道的支持波长与时隙联合调度的动态 TWDM PON 方案中,一般通过在一套系统中采用可调收发机或两套以上收发机的方式<sup>[6,11-12]</sup>,将拥挤的光波长上的数据流量调整到非拥挤的光波长上,并结合光网络单元(ONU)间带宽时隙调度的方式同时实现对波长与时隙的动态调度。但现有解决方案会导致 ONU 成本较高,对于成本敏感的 ONU 而言不是有效的解决方案。针对上述问题,我们提出了一种基于波长变换型远端节点(RN)的环树型时分波分复用(TWDM)光接入网络方案<sup>[13-14]</sup>。RN 将所分配的光波长转换为符合标准规定的固定波长,并用于在树型网内进行上下行数据传输。基于这种机制,在所设计的 TWDM-PON 光网络结构中仍然可以后向兼容地继续使用现有标准化的各类 ONU。从而将成本由 ONU 转移到对成本相对不敏感的 RN 上。但是,该网络结构依然需要解决现有 TWDM

近年来,随着高清视频、网络电视(IPTV)、P2P 等为代表的高速率高质量业务的发展使得网络中的数据流量正在飞速增长<sup>[1-2]</sup>。根据 Cisco 公司预测 2016 年全球 IP 数据量将突破 ZB (10<sup>21</sup> Byte) 大关,达到 1.3 ZB/年。网络数据的增加必将推动网络容量的提升,作为下一代接入网的主要解决方案,光接入网的高速大容量化是其技术发展趋势<sup>[3-5]</sup>。另一方面,

随着接入用户数量的增加及用户带宽的提升,由于商业用户与居民用户所产生的业务时间、地点不同及宽带移动终端用户的突发汇集等原因<sup>[6]</sup>,导致未来接入网数据流量的突发性、快速或慢速的大带宽波动性等特征将会进一步凸显。因此,下一代光接入网在具备大容量的同时,还应具备灵活调整带宽资源分配的能力以应对流量在时间与空间分配上的波动。

既可前向兼容现有时分复用无源光网络(TDM PON)系统以实现网络平滑升级,又能动态地调度波长和时隙资源以应对业务流量的波动,混

收稿日期: 2014-07-07

网络出版时间: 2014-08-21

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2011AA01A104); 国家自然科学基金(61302079)



PON 都面临的问题,即提出基于实时流量波动条件的波长与时隙联合动态资源调度解决方法。

本文针对 TWDM PON 面临的动态资源调度方法问题,提出了一种基于波长变换型远端节点(RN)的环树型 TWDM PON 网络方案,并基于所设计的 TWDM PON 方案,提出了两种分别具有更好服务质量(QoS)和更长设备使用寿命特征的动态波长和带宽分配(DWBA)算法,另外对 DWBA 问题中的约束和难点进行了分析阐述。所提的 DWBA 算法具有很好的兼容性,可以有效地应用到其他 TWDM PON 系统结构中。

## 1 基于波长变换型 RN 的环树型 TWDM PON 结构

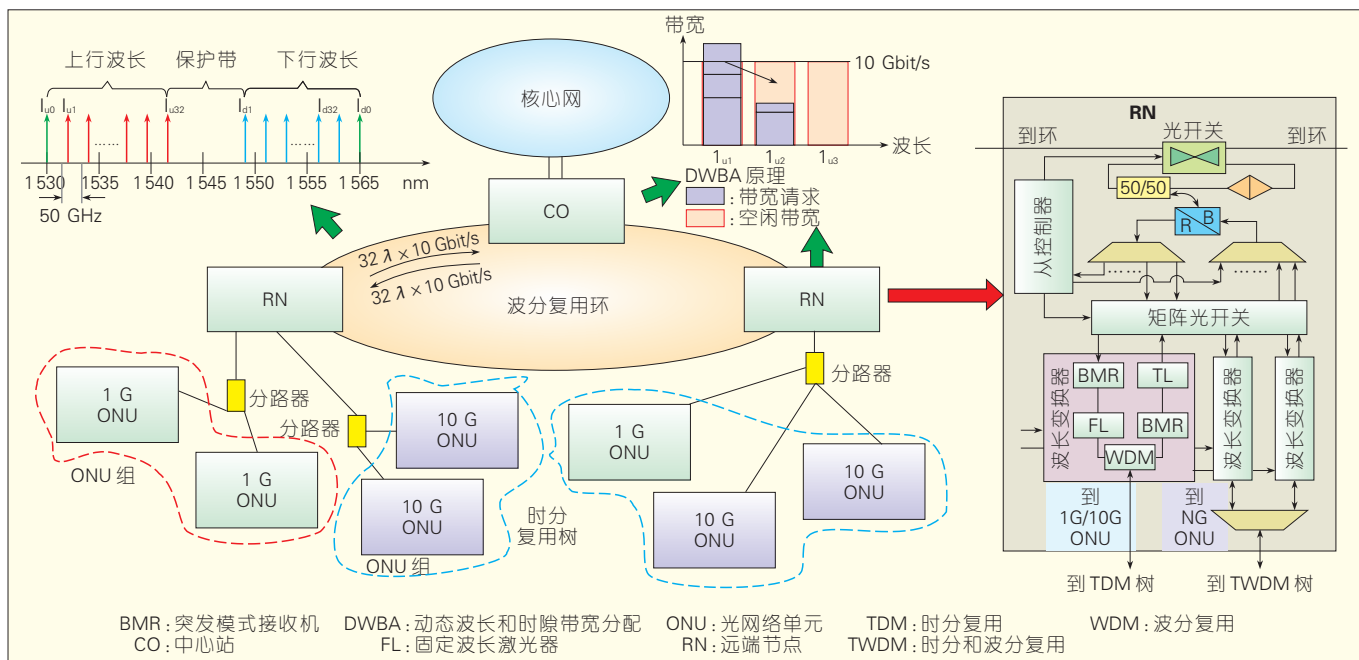
本文提出的 TWDM PON 网络结构如图 1 所示。该方案由中心站(CO)、环型网结构、RN、树型网结构、ONU 等部分构成。一根双向光纤环型结构将 CO 与多个 RN 连接在一起。环型光纤结构上运行多个工作波长,且在 CO 控制下各波长可以动态的在各 RN 间分配,各 RN 可同时分配得到一个或多个上下行光波长。

RN 处可以进行波长变换,保证树型结构中使用的波长与环型结构中使用的波长相互独立。每个 RN 可连接若干个 TDM 树。同一个 TDM 树下的所有 ONU 可以构成一个 ONU 组。在 50 km 环型结构长度和 20 km 树型结构长度下,该结构最多可以支持 8 192 个 ONU。根据需求,该系统环形结构可支持上下行各 32 波及以上波长(如  $\lambda_{u1}, \dots, \lambda_{u32}, \lambda_{d1}, \dots, \lambda_{d32}$ )且单波长速率 10 Gbit/s 的业务波长,另外还有 1 对控制波长(如  $\lambda_{uc}, \lambda_{dc}$ )。波长间隔符合 ITU-T 规定的 50 GHz 栅格。上下行波段分别位于 C 波段的红区和蓝区。上下行波段间设有 6 nm 的保护带。

在 RN 处,所有的下行信号通过 50/50 功率耦合器和红蓝滤波器下路,并被阵列波导(AWG)解复用。解复用后,一方面,固定的控制波长被直接送进从控制器。从控制器提取 RN 控制信息,然后指导矩阵光开关进行波长选择和路由。另一方面,其他波长被送入矩阵光开关,矩阵光开关选择指定的波长下路,并在波长变换后将下路的波长送往 ONU。上行信号沿着与下行信号相反的路径

传输。不同之处是,波长变换器会根据从控制器的控制调整内部可调激光器的上行波长,并发送上行信号。这样,与下行信号一样,环上承载业务的上下波长可以动态地被不同 RN 共享。另外,每个波长上的时隙分配信息由下行业务波长承载着送到 ONU,而 ONU 的带宽请求利用上行业务波长送到 CO。

基于 CO 端的 DWBA 的控制,上下行业务波长可以被动态的分配给不同的 ONU 组,从而可以根据各 ONU 的带宽需求实现对波长分配调度,实现波分的高效利用。例如如图 1 右上角所示,以上行为例,当使用  $\lambda_{u1}$  的 ONU 组的总带宽请求已经超过 10 Gbit/s 的总容量时,其中一个 ONU 组被重新分配给有空闲带宽的  $\lambda_{u2}$ 。因为  $\lambda_{u1}$  和  $\lambda_{u2}$  就可以承载全部的带宽请求,所以  $\lambda_{u3}$  没有被分配给任何 ONU 组使用,可以被关闭以获得系统节能。该网络结构的另一特点是支持前后向兼容性。同一标准体系下,10G-ONU 可以替代已经部署的 1G-ONU,并且和剩余的 1G-ONU 共存。通过 RN 的波长变换器,TDM 树上既可以使用标准规定的波长,又可以使



▲ 图 1 基于波长变换型 RN 的环树型 TWDM PON 方案

用由下行突发信号填充所形成的连续信号。

作为典型的应用场景之一,图2介绍了在 IEEE 标准体系下 1 Gbit/s EPON ONU 和 10 Gbit/s EPON ONU 的共存方式。在树型结构部分,下行使用 WDM 共存,而上行采用双速率 TDMA 的传输方式。在环形结构部分,上行依然采用双速率 TDMA 的传输方式,而下行则采用双速率 TDM 的方式。下行采用双速率 TDM 的原因是环形结构部分的成本相对不敏感,而波长资源相对紧张。CO 和 RN 中的双速率接收机<sup>[15]</sup>用来接收同波长的 1 Gbit/s 和 10 Gbit/s 信号。对于该方案的实施可行性,对于树型结构部分,该方案可以前后兼容现有 PON 系统实现对已有投资的保护,对于环型结构部分,可以利用现有的 SONET/SDH 城域光纤环路设施,该方案的部署只需要更换替代 RN 处的设备。因此,上述原因保证了该方案的实施可行性。

## 2 环树型 TWDM-PON 动态资源调度机制及算法

### 2.1 DWBA 机制

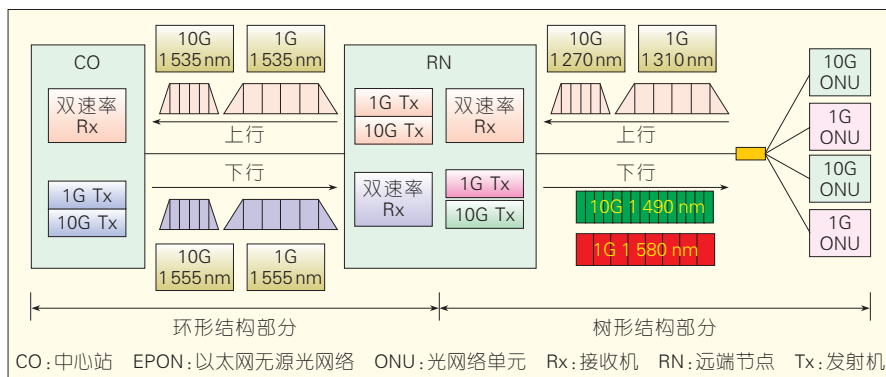
在所设计的基于波长变换型 RN 的环树型 TWDM PON 方案中采用了集中式的带宽分配,由 CO 统一分配全网的波长和时隙资源,并控制 RN 和 ONU 执行分配结果。图3是带宽分配实施的处理流程。流程如下:

(1) ONU 使用带内开销向 CO 上报带宽请求。

(2) 基于可用带宽资源、ONU 的上下行带宽需求和用户服务协议,CO 运行 DWBA 算法,DWBA 算法用来决定 RN 处的上下行波长,并为每个 ONU 安排上下行传输窗口的长度和起始时刻。

(3) OLT 将分配结果通知给 RN,并在相应的数据到达 RN 时,RN 能够正确的选择上下行波长。

(4) 基于 DWBA 算法的分配结



▲图2 1 Gbit/s EPON 和 10 Gbit/s EPON 共存环境下的上下行传输

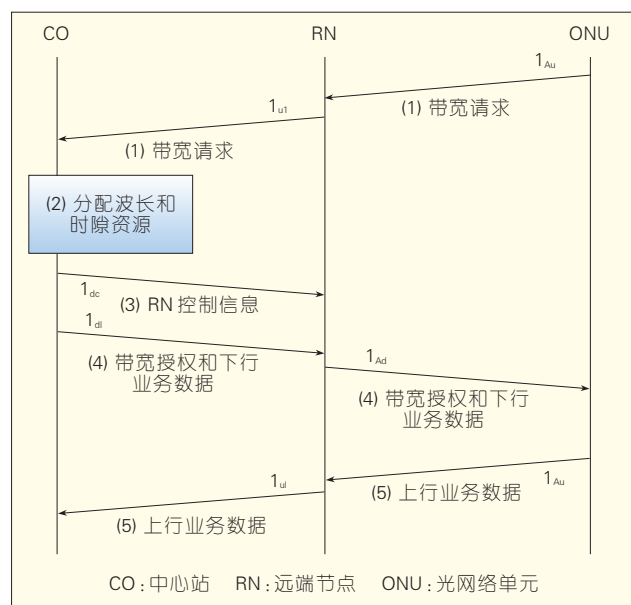


图3▶  
带宽分配处理流程

果,OLT 发送下行业务数据和带宽授权信息。

(5) ONU 从带宽授权中获知上行带宽分配的结果,并在规定的窗口发送上行业务。

### 2.2 数学模型

为了提出及设计 DWBA 算法,我们利用混合整数线性规划 (MILP) 模型对所设计环树型 TWDM PON 中的带宽分配问题进行了分析。带宽分配采用固定的分配周期。在一个分配周期内,波长分配固定。ONU 的带宽请求不能超过预算的最大带宽门限。基于上述前提,该带宽分配问题可以表述如下:

已知:

$N$ : ONU 个数。

$G$ : ONU 组个数。如图1所示,共享同一对树波长的 ONU 定义为一个 ONU 组。

$R$ : RN 个数。

$M$ : 环上可用波长数。

$Req_n, 0 \leq n \leq N$ : ONU 带宽请求。

$B_t$ : 切换次数门限。RN 中矩阵光开关的最大切换次数。

$B_{BW}$ : 单波长的容量门限。

定义:

$ONU = \{1, 2, \dots, N\}$ : ONU 的集合

$Group = \{1, 2, \dots, G\}$ : ONU 组的集合。每个组包括多个 ONU。例如,  $g = \{n_1, n_2\} \in Group$ , 其中,  $n_1, n_2 \in ONU$ 。

$RN = \{1, 2, \dots, R\}$ : RN 的集合。每个 RN 包含多个 ONU 组。例如,

$r = \{g_1, g_2\} \in RN$ , 其中,  $g_1, g_2 \in Group$ 。

$W = \{1, \dots, M\}$ : 波长的集合。

$\rho_{n,m}$ : 当前周期的带宽分配结果。当第  $n$  个 ONU 被分配到第  $m$  个波长上时,  $\rho_{n,m} = 1$ 。否则,  $\rho_{n,m} = 0$ 。

$\rho'_{n,m}$ : 上一周期的带宽分配结果。对于第一周期,  $\rho'_{n,m}$  可以采用默认值。

约束条件:

(1) 单波长容量受限

$$\sum_{n=1}^N \rho_{n,m} \text{Re } q_n \leq B_{BW}, \forall m \in W \quad (1)$$

(2) 同一 ONU 组中的 ONU 使用相同的环波长

$$\sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2 \neq m_1}^M \rho_{n_1, m_1} \rho_{n_2, m_2} = 0, \quad \forall g \in Group, \forall n_1, n_2 \in g \quad (2)$$

$$0 \leq \sum_{m=1}^M \rho_{n,m} \leq 1, \forall n \in ONU \quad (3)$$

(3) 相同 RN 下的 ONU 组使用不同的环波长

$$\sum_{m=1}^M \rho_{n_1, m} \rho_{n_2, m} = 0, \forall r \in RN, \forall g_1, g_2 \in r, \forall n_1 \in g_1, \forall n_2 \in g_2 \quad (4)$$

(4) 光开关的切换次数受限

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\rho_{n,m} - \rho'_{n,m}| \leq B_t \quad (5)$$

优化目标:

找出满足最多带宽请求的分配方式。

$$\text{Maximize } \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{n,m} \text{Re } q_n \quad (6)$$

上行和下行带宽分配问题都可以利用上述模型表达。虽然可以利用 AMPL/CPLEX 求得最优的带宽分配方案  $\rho_{n,m}$ , 但是求得的最优解无法应用于实际网络。带宽分配问题是 NP-hard 问题<sup>[16]</sup>, 所以需求最优解的算法复杂度高。算法的执行实际太长以致于不能及时得到分配结果。另外, 最优解无法保证不同 ONU 间的公平性, 甚至会出现 ONU 饿死的现象。所以, 我们提出两种复杂度低的启发式算法, 以追求带宽分配问题

的近似最优解。

### 2.3 启发式 DWBA 算法

通过松弛带宽分配问题的约束条件和优化目标, 我们对所设计环树型 TWDM PON 提出了最大带宽利用率算法和最小切换次数算法两种 DWBA 算法。最大带宽利用率算法尽可能的利用带宽资源, 但是不考虑上述约束条件(4)对光开关切换次数的限制。最小切换次数算法通过减少光开关切换次数尽可能的延长设备的使用寿命, 故不以带宽利用率为第一位的优化目标。

两个算法的伪代码如图 4 所示。DWBA 分配问题被分为动态波长分配算法(DWA)和动态时隙带宽分配算法(DBA)。DWA 每  $K$  个周期为 RN 分配一次上下路光波长。对于最小切换次数算法, 它首先尝试仍然为 ONU 分配前一周期使用的波长。当前一周期使用的波长当前周期不可用或者采用了最大带宽利用率算法时, ONU 会被尝试安排给用于更多可用带宽资源的工作波长。最后, 如果通过上述步骤, 仍然无法为一个 ONU 找到合适的工作波长, 忽略上述约束条件(1), 将该 ONU 安排给承载最少带宽请求的波长。DBA 用来为各

ONU 组中的 ONU 分配传输时间窗口的大小和起始时间。每个周期每个波长都要执行一次 DBA。所采用的 DBA 算法用于承载有平均速率保证的变速率突发业务<sup>[17]</sup>。两个算法的时间复杂度相同, 都是  $O(NM)$ 。DWBA 算法伪代码如图 4 所示。

### 3 环树型 TWDM-PON 动态资源调度算法性能分析

为了分析所提 DWBA 算法的性能, 我们利用 MATLAB 建立了仿真系统。仿真系统由 16 个 RN、64 个 ONU 组和 512 个 10G-ONU 组成。环上业务波长的个数最大为 16 个。只对上行传输进行了仿真。采用了 0.8 Hurst 参数的自相似数据源。每个 ONU 拥有一个 10 MB 的先入先出(FIFO)队列。DWA 和 DBA 周期都设为 2 ms。仿真结果如图 5 所示。

图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)对两个算法进行了对比。仿真中采用了有大负载和小负载两类 ONU 的两点分布。例如, 白天大负载 ONU 可以代表商业用户, 而小负载 ONU 用来模拟居民用户。两类 ONU 的平均速率分布为 400 Mbit/s 和 100 Mbit/s。通过调整大负载 ONU 的个数从 0 到 256 个, 相应的归一化网络负载由 0.32 变

化到了 0.8。平均看, 与最小切换次数算法相比, 最大带宽利用率算法可以多关闭 0.73 个工作波长, 并提高 3.81% 的带宽利用率。最小切换次数算法最大需要光开关每秒切换 26 次, 但是最大带宽利用率算法要切换 1 858 次。两种算法的时延和时延抖动相似。

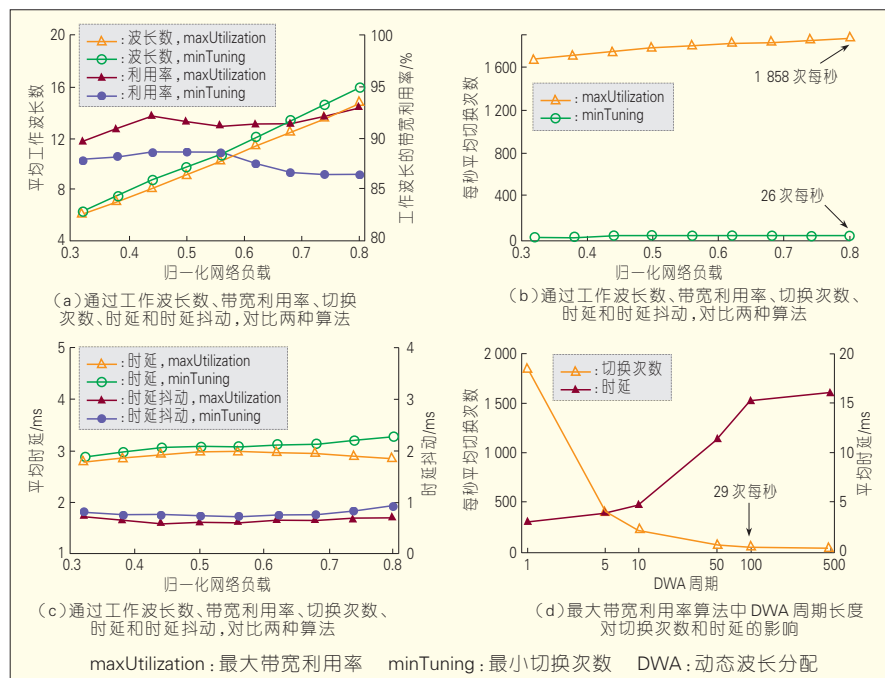
考虑到矩阵光开关的有效开关次数可以达到 10 亿次以上。为了使光开关能工作 10 年以上, 则每秒钟其切换次数要小于 32 次。因此, 上

```

1. 每 K 个周期运行 DWA 一次
2. 计算需要使用的的工作波长数
3. while 还能找到非 0 的 Req_n
4. 只在 minTuning 算法中运行
5.   If ONU_n 的上周期的工作波长没有关闭且符
      合约束条件(1)-(3), 沿用上周期的工作波长
6.   在 maxUtilization 和 minTuning 算法都运行
7.   按照可用带宽资源降序选取工作波长
8.   If 符合约束条件(1)-(3), 将 ONU_n 安排到当前
      波长上
9.   If not, 尝试下一个波长
10. 临时将 Req_n 设置为 0
11. end while
12. 逐个选取没有安排工作波工的 ONU
13. 将选取的 ONU 安排到当前承载带宽请求最少的
    波长上
14. 每个周期运行 DBA
    maxUtilization: 最大带宽利用率   DWA: 动态波长分配
    minTuning: 最小切换次数
  
```

▲图 4 DWBA 算法伪代码





▲ 图 5 仿真结果

述最大带宽利用算法的切换次数太多。我们提出了通过延长 DWA 周期来减少光开关的切换次数。如图 4 (d) 所示, 当 DWA 周期  $K=100$  时, 每秒钟切换次数降到了 29 次, 但相应时延也会有所上升, 约 15 ms。

## 4 结束语

本文讨论了环树型 TWDM-PON 接入方案中的波长与时隙动态分配与调度问题, 并基于 MILP 模型对该问题进行了建模分析。进而提出了最大带宽利用率算法和最小切换次数算法两种 DWBA 算法。仿真结果显示了两种算法的有效性。但对比显示最小切换次数算法的性能相对更占优, 它能够在保证时延的前提下, 在现有光开关运行次数条件下系统可保证 10 年以上的有效运行时间。此外, 本文还描述了环树型 TWDM-PON 接入方案的后向兼容性和成本效益。

## 参考文献

- [1] DUSER M. A review of past, present and future optical networks optics is driving structural change [R]. OFC/NFOEC, 2011.

- [2] ELAINE W. Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2012, 30 (4):597-608.
- [3] YU J J, JIA Z S, HUANG M F, MUHAMMAD H, et al. Applications of 40-Gbit/s Chirp-Managed Laser in Access and Metro Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3):253-265.
- [4] QI G, AN V T. Demonstration of 40-Gbit/s WDM-PON System Using SOA-REAM and Equalization [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24, (11): 952-953.
- [5] KIM J Y, YOO S H, MOON S R, KIM D C, LEE C H. 400 Gbit/s ( $40 \times 10$  Gbit/s) ASE Injection Seeded WDM-PON based on SOA-REAM [R]. OFC, 2013.
- [6] TRAN N C, OKONKWO C, TANGDIONGGA E, JUNG H D, KOONEN T. Cyclic-linked flexibility: An architectural approach for reconfigurable optical WDM-TDM access networks [J]. IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., 2013, 5(6):574-583.
- [7] OSSIEUR P. Hybrid DWDM-TDMA PONs for next generation access [R]. OFC/NFOEC, 2012.
- [8] WONG E. Characterization of energy-efficient and colorless ONUs for future TWDM-PONs [J]. Optics Express, 2013, 21 (18):20747-20761.
- [9] OSSIEUR P, ANTONY C, NAUGHTON A, et al. Demonstration of a  $32 \times 512$  Split, 100 km Reach,  $2 \times 32 \times 10$  Gbit/s Hybrid DWDM-TDMA PON Using Tunable External Cavity Lasers in the ONUs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(24): 3705-3718.
- [10] ITU-T. Recommendation ITU-T G.989.1. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): general requirements [S]. ITU-T, 2013.
- [11] BI M, XIAO S, YI L, HE H, LI J, YANG X, HU

W. Power budget improvement of symmetric 40-Gbit/s DML-based TWDM-PON system [J]. Opt. Express, 2014, 22(6): 6925-6933.

- [12] CHENG N, GAO J, XU C, GAO B, LIU D, WANG L, WU X, ZHOU X, LIN H, EFFENBERGER F. Flexible TWDM PON system with pluggable optical transceiver modules [J]. Opt. Express, 2014, 22(2): 2078-2091.
- [13] HU X T, CHEN X, ZHANG Z G, et al. Flexible ring-tree TWDM network architecture for next generation optical access network [C]// Proceedings of the the 23rd Wireless and Optical Commun. Conf., Newark, NJ, May 9-10, 2014.
- [14] HU X T, CHEN X, ZHANG Z G, et al. Ring-tree TWDM Optical Access Network with Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation [R]. CLEO, 2014.
- [15] TANAKA K, AGATA A, HORIUCHI Y. IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status [J]. Lightwave Technol., 2010, 28(4): 651-661.
- [16] ZHANG J, ANSARI N. Scheduling hybrid WDM/TDM passive optical networks with nonzero laser tuning time [J]. IEEE/ACM Trans. on Netw., 2011, 19(4): 1014-1027.
- [17] ZHANG J, ANSARI N, LUO Y, EFFENBERGER F, YE F. Next-generation PONs: a performance investigation of candidate architectures for next-generation access stage 1 [J]. IEEE Commun. Mag., 2009, 47(8): 49-57.

## 作者简介



张治国, 北京邮电大学博士毕业; 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院副教授; 主要研究领域为宽带光接入与光纤传感技术; 已主持和参加基金项目 10 余项; 已发表论文 30 余篇, 其中被 SCI/EI 检索 10 余篇。



胡新天, 北京邮电大学在读博士研究生; 主要研究领域为下一代光接入网, 包括设计新型网络结构, 并研究下一代光接入网中的资源动态调度、生存性和节能等关键技术; 已发表论文 10 篇。



陈雪, 北京邮电大学教授、博士生导师, 北京邮电大学学术委员会委员, 信息光子学与光通信研究院学术委员会副主任; 主要研究方向为光接入网与高速大容量光纤传输技术; 已主持和参加基金项目 10 余项; 已发表论文 100 余篇, 出版著作 6 部。

# 下一代无源光网络的标准进展

## Standardization of Next-Generation PON

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0034-004

**摘要:** 探讨了ITU-T G.989.2 下一代无源光网络标准(NG-PON2)物理媒质相关层(PMD)的物理层需求和规范,包括下一代无源接入网络的架构、用户网络侧接口与业务节点接口、对光配线网络(ODN)的需求、NG-PON2的X/S容限、时分波分复用无源光网络(TWDM-PON)和点对点连接波分复用无源光网络(PtP WDM-PON)的PMD层要求。认为NG-PON2单PON口实现40 Gbit/s的带宽能力,面向大容量、全业务的光接入网络,应用时间窗口应在2016年之后。

**关键词:** 下一代无源光网络;物理媒质相关层;波长可调光网络单元

**Abstract:** The requirements and specifications for the PMD of next-generation-2 (NG-PON2) defined in ITU-T G.989.2 are discussed in this paper. These include network architecture, user networks interface and service node interface, requirements for ODN, X/S tolerance of NG-PON2, PMD of TWDM-PON and PtP WDM-PON. In our view, large-capacity, full-service NG-PON2 access network with a bandwidth of 40 Gbit/s per PON port will be realized after 2016.

**Key words:** next generation passive optical network; physical media dependent layer; tunable ONU

程强/CHENG Qiang

苟书智/GOU Shuzhi

(工业和信息化部电信研究院通信标准研究所,北京 100191)

(Institute of Communication Standards Research, China Academy of Telecom Research, MIIT, Beijing 100191, China)

无源光网络(PON)技术是宽带光接入光纤到户(FTTH)和光纤到大楼(FTTB)网络的主要解决方案。截至2013年底,全球固定宽带接入用户约6.78亿,其中FTTH或FTTB网络所服务的用户已经占到所有宽带用户数的30%,并排在所有接入技术的用户数增长率的前两名<sup>[1]</sup>。

PON相关技术领域的标准化活动主要集中在ITU-T第15研究组和IEEE 802.3工作组。在2003到2004年间,两个组织分别完成了千兆比无源光网络(GPON)的ITU-T G.984系列标准和以太网无源光网络(EPON)

的IEEE 802.3ah标准,奠定了现有PON技术路线两大阵营。随后在2008到2010年,GPON和EPON标准分别演进为ITU-T G.987系列的XG-PON和IEEE 802.3av的10G-EPON。

为了适应下一代高速、灵活、全业务的光接入网络的需求,在运营商主导的全业务接入网(FSAN)论坛的引领下<sup>[2]</sup>,ITU-T第15研究组率先开展了对下一代无源光网络标准(NG-PON2)的研究。到目前为止,ITU-T关于下一代无源光网络标准体系的布局已经基本完成,形成了以G.989系列为代表的NG-PON2标准系列,并逐步完成该系列标准。

### 1 NG-PON2 标准体系

在完成GPON/XG-PON的标准化

工作之后,FSAN/ITU-T以“低成本、高容量、广覆盖、全业务、高互通”为演进目标,迅速推进下一代PON技术标准的研究和制订。同时,FSAN/ITU-T也提出面对更长期的演进,NG-PON2系统可以不考虑与旧有的TDM(时分复用)PON光配线网络(ODN)兼容,以全新场景为牵引,选择除TDM PON以外的更多的可用技术。

ITU-T NG-PON2标准目前主要包括以下几个部分:

#### (1) ITU-T G.989

ITU-T G.989标准规范了NG-PON2系列规范中所用到的定义、术语和缩略语。该标准计划于2014年12月在ITU-T SG15全会通过<sup>[3]</sup>。

#### (2) ITU-T G.989.1

ITU-T G.989.1标准规范了对NG-PON2的总体要求,概括性地阐述了NG-PON2系统的物理层传输规格、业务能力和网络性能等内容,于2012年9月ITU-T第15研究组全会上通过。该标准提出NG-PON2应当支持40 GHz下行带宽、10 GHz上行带宽(可扩展到40 GHz)、40 km最大差分距离(20 km~40 km可配置),最大支持60 km传输距离,支持1:256的最大

收稿日期: 2014-07-07

网络出版时间: 2014-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(61171076、61201260)

分路比,上下行至少4个时分波分复用(TWDM)通道<sup>[4]</sup>。

### (3) ITU-T G.989.1 Amendment 1

ITU-T G.989.1 Amendment 1 标准对 G.989.1 进行增补。计划对 G.989.1 补充 NG-PON2 的保护架构和无线前传等要求。

### (4) ITU-T G.989.2

ITU-T G.989.2 标准的范围是规范 NG-PON2 的物理媒质层参数,直接决定了 NG-PON2 的实现技术和网络性能,是 NG-PON2 系列规范中最具代表性的规范,其中包括了时分波分复用无源光网络(TWDM-PON)和波分复用无源光网络(WDM-PON)两部分的物理媒质相关层(PMD)参数。G.989.2 草案已经讨论了近两年的时间,标准主要内容已达成一致,目前处于最后公示阶段,计划于2014年12月在ITU-T SG15全会上提交批准<sup>[5]</sup>。

### (5) ITU-T G.989.2 Amendment 1

ITU-T G.989.2 Amendment 1 标准对 G.989.2 进行增补。目前没有时间计划。

### (6) ITU-T G.989.3

ITU-T G.989.3 标准的范围是规范 NG-PON2 中 TWDM-PON 系统的传输汇聚(TC)层的功能特性,包括成帧、动态带宽分配(DBA)、物理层适配、物理层运行、管理和维护消息(PLOAM)、光网络单元(ONU)激活以及光线路终端(OLT)与 ONU 的定时关系等一系列的内容。与 GPON/XG-PON 的 TC 层相比, TWDM-PON 系统的传输汇聚层需要在多个波长中进行协调,因此在相关章节中都加入了对波长调谐和控制的功能<sup>[6]</sup>。

## 2 NG-PON2 物理媒质相关层规范

G.989.2 描述了 NG-PON2 PMD 层的物理层需求和规范。其中包括下一代无源接入网络的架构、用户网络侧接口与业务节点接口、对 ODN 的需求、NG-PON2 的 X/S 容限、TWDM-

PON 和点对点连接波分复用无源光网络(PtP WDM-PON)的 PMD 层要求等。

G.989.2 是 NG-PON2 规范中最为基础的部分,下面对标准中定义的主要内容进行介绍。

### (1) 系统架构

图 1 给出了 NG-PON2 在 PMD 层面的系统架构,其定义的各参考点如下:

- S: 到网络侧的发送接口
- R: 来自于网络侧的接收接口
- S/R, R/S: 当系统工作在双向模式时, S/R 与 R/S 指 S、R 的组合同时存在于单根光纤,其中, S/R 参考点特指 OLT 侧, R/S 参考点特指 ONU 侧。

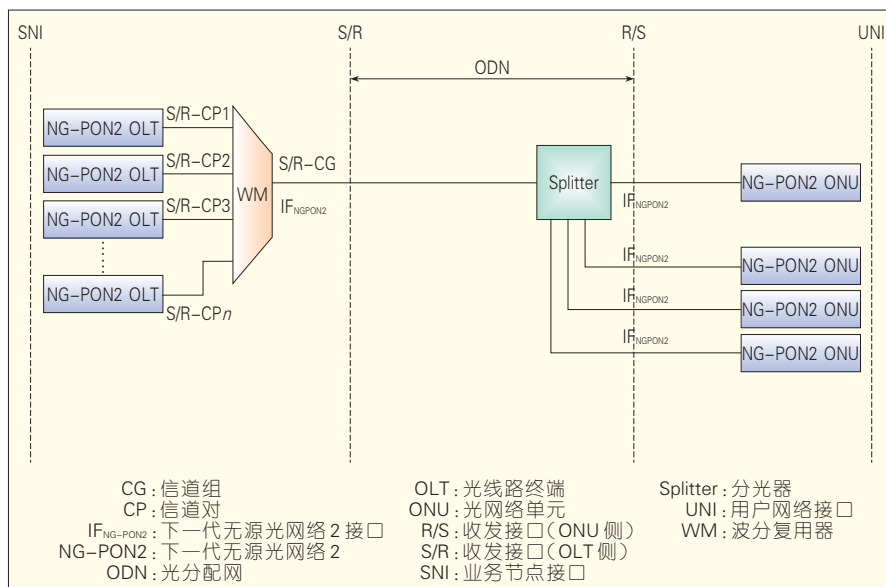
在图 1 显示的单 OLT 环境下 NP-PON2 PMD 层的逻辑架构中,每一个 ONU 都配备了波长可调发射机与波长可调接收机。ONU 波长可调发射机必须满足表 1 所规定的 TWDM-PON 或 PtP WDM-PON 分配的任何上行波长。ONU 波长可调接收器必须能满足校准至任何表 1 所指定的 TWDM-PON 或 PtP WDM-PON 分配的下行波长。这种架构同时满足点对点连接 TWDM-PON 与虚拟点对点连接 WDM-PON 两种物理层面的实现方式。

### (2) 光功率预算

NG-PON2 系统定义了 4 种光功率预算等级:等级 N1、等级 N2、等级 E1 和等级 E2,分别与 XG-PON1 系统定义的对应等级兼容,其中等级 N1 与等级 E1 分别对应于 GPON 系统等级 Class B+ 和 Class C+。光功率预算等级如表 2 所示。

### (3) 波长规划

G.989.2 标准规定了如表 1 所示的 TWDM-PON 和 PtP WDM-PON 频谱。任何时候,当 TWDM-PON 与/或者传统 PON 系统频带内不使用频谱的某些部分时, PtP WDM-PON 应被允许在上行与/或下行方向使用那个特定的子频带,但此时 PtP WDM-PON 的波长应该考虑与 TWDM-PON 与/或者传统 PON 系统的隔离需求。当 TWDM-PON 与 PtP WDM-PON 共存时,两种技术的波长通道可以占有相邻的频率栅格,但是此时 TWDM-PON 与 PtP WDM-PON 通道不允许交错。当分别使用波分复用器时, TWDM-PON 与 PtP WDM-PON 之间的保护带最小为 3 nm。在 1 603 ~ 1 625 nm 共享频谱场景中, PtP WDM-PON 上行通道应在共享频谱中使用较短波长。当 PtP WDM-PON 与 TWDM-PON 使用共享的波分复用器时,保护带最



▲ 图 1 NG-PON2 逻辑架构



▼表 1 NG-PON2 波长规划

波长兼容系统	时分波分复用无源光网络(下行)	时分波分复用无源光网络(上行)	点对点连接波分复用无源光网络(上行/下行)
GPON、 RF Video、 XG-PON1	1 596 ~ 1 603 nm	宽范围: 1 524 ~ 1 544 nm, 缩小范围: 1 528 ~ 1 540 nm (注: 与 DWDM 实际栅格 nm 值对齐), 窄范围: 1 532 ~ 1 540 nm	共享频谱: 603 ~ 625 nm, 扩展频谱: 1 524 ~ 1 625 nm

▼表 2 光功率预算等级

性能	等级 N1	等级 N2	等级 E1	等级 E2
最小损耗	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
最大损耗	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB
兼容	GPON B+、 XG-PON N1 class	XG-PON N2 class	GPON C+、 XG-PON E1 class	—

小要求为 100 GHz。

PtP WDM-PON 子频带的波长规划定义取决于与 TWDM-PON 共存的需求。在扩展频谱场景中, G.694.1<sup>[7]</sup>或 G.698.3<sup>[8]</sup>所定义的 DWDM 栅格将被使用。如果需要完全共存, 那么应使用表 1 所示的共享频谱范围。

#### (4) 线路速率

NG-PON2 针对 TWDM 系统和 PtP WDM 系统分别定义了线路速率。TWDM 定义了 3 种上下行速率组合, 即下行 10 GHz、上行 2.5 GHz, 上下行 10 GHz, 上下行 2.5 GHz, 其单波长下行/上行线路速率与 XG-PON1 对应速率相同。线路编码依然维持 XG-PON1 加扰不归零(NRZ)码。为减轻对 Video RF 系统的拉曼效应干扰可选支持 8B10B 或密勒代码(Miller Code)。

PtP WDM 根据线路速率的高低分为 4 个速率等级, 共支持 12 种业务速率, 线路编码由对应业务的编码方式确定。TWDM-PON 线速率选择如表 3 所示, PtP WDM-PON 线速率选择如表 4 所示。

#### (5) 光收发器波长调谐时间

NG-PON2 方案的关键特点就是采用波长可调的发射机、接收机。在从 OLT 至 ONU 的下行方向, 一个波长可调 ONU 接收机需要能选择合适的

波长信道。在从 ONU 至 OLT 的上行方向, ONU 发射机可在指定的波长通道上发送信号。

G.989.2 针对可调发射机的波长特性定义了中心频率、波长偏移、通道间隔和调谐特性等一系列参数。其中波长通道调谐时间根据不同的用途分为 3 类, 如表 5 所示。

#### (6) NG-PON2 的 X/S 容限

由于 NG-PON2 为多波长系统, 因此对于 (OLT 侧或 ONU 侧) 某波长的接收机来说, 存在来自于其他 NG-PON2 波长通道的干扰信号。在 ONU 场景中, 干扰信号也可能来自于例如 GPON、XG-PON1、光时域反射仪(OTDR)管理波长这样的传统共存系统。为了尽量减少干扰信号的影响, NG-PON2 接收器需要一个合适的波长滤波器来过滤它们。

标准里没有直接指定波长滤波器的隔离特征, 而是指定 NG-PON2 接收机的 X/S 容限。在这里, S 是指在单个波长通道内的聚合 NG-PON2 信号光功率, X 指聚合干扰信号, 传统系统的信号与其他 NG-PON2 波长通道信号。以上两者都在接收机参考点 R 处测量。

为测试 X/S 容限, 应使用 NRZ 伪随机码所构成的干扰信号模版。其中, NRZ 伪随机码线速率相同于 NG-

PON2 信号。在 TWDM-PON 场景下, 8 个通道被认为是最恶劣的场景配置。

#### (7) 参考点 R 处的接收机参数

参考点 R 处的接收机参数包括接收机灵敏度、接收机过载、最大光通道代价、接收波长最大反射比、差分光路损耗、时钟提取能力、连续相同数字免疫、接收机反射功率容限、传输质量和误码特性等。

接收机灵敏度指标中考虑了由几种消极因素所引起的光功率代价, 包括使用发射机在标准允许条件下最差的消光比、脉冲上升与下降时间、R 点处的光回波损耗, 以及接收机连接器老化、测量公差等。但接收机灵敏度不包括与色散、抖动相关引入的代价和光通道反射引入的代价。这些影响因素分配在最大光通道代价指标中。

▼表 3 TWDM-PON 线速率选择

线速率	下行/上行标称线路速率/(Gbit/s)
基本速率	9.953 28/2.488 32
可选速率 1	9.953 28/9.953 28
可选速率 2	2.488 32/2.488 32

▼表 4 PtP WDM-PON 线速率选择

线路速率等级	标称线路速率 (对称下行与上行)/(Gbit/s)	支持的业务
1	1.244 16	STM-8
	1.25	1 G 以太网
	1.228 8	CPRI 选项 2
2	2.488 32	OC-48、STM-16
	2.457 6	CPRI 选项 3
	2.666	OTU1
3	9.953 28	OC-192、STM-64
	9.830 4	CPRI 选项 7
	10.709、11.09	OTU2、OTU2e
4	10.312 5	10GBase-ER
	6.144	CPRI 选项 6、OBSAI

▼表 5 波长通道调谐时间等级

等级	调谐时间
等级 1	小于 10 $\mu$ s
等级 2	10 ~ 25 ms
等级 3	25 ms ~ 1 s

### (8) 参考点S处的发射机参数

参考点S处的发射机参数主要涉及源类型、光谱特性、平均发射功率、发送眼图模版等。

由于ONU发射机波长可调,在频谱特性中定义了波长调谐范围、波长调谐粒度、最大可调的频谱偏移等相关指标。

标准以参考点S处的发射眼图模版形式指定了通用发射脉冲波形特征,其中包括上升时间、下降时间、脉冲超调、脉冲下冲和振铃,这些特征都应被控制来防止接收机灵敏度的过度恶化。

### (9) 抖动特性

TWDM-PON光接口定义了抖动转移特性、抖动容限和输出抖动3个指标。

其中抖动转移特性仅针对ONU定义,考察了ONU对接收的下行光信号的抖动转移到上行发送信号的抖动的增益,应小于0.1 dB。

抖动容限定义为TWDM-PON接收机当收到正弦抖动信号叠加在输入的TWDM-PON信号,在光设备中引起1 dB的链路代价时,此时正弦抖动信号的峰峰振幅值定义为抖动容限。ONU和OLT的抖动容限的模板如图2所定义。其中对OLT抖动容限的要求是参考性的,因为OLT的接收机是突发接收,而抖动容限的测量只能在允许连续上行信号的条件。

当没有外部抖动信号加入OLT或ONU的定时参考时,OLT和ONU的PON口输出抖动都应满足表6所示的要求。

## 3 结束语

下一代无源光网络(NG-PON2)单PON口实现40 Gbit/s的带宽能力,面向大容量、全业务的光接入网络,应用时间窗口应在2016年之后。NG-PON2技术上采用了可调波长收发器等全新的技术手段,相比目前实用化的GPON、EPON在技术上将有重大突破<sup>[9-15]</sup>。

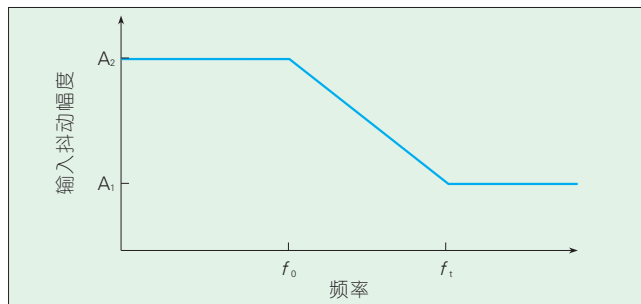


图2  
抖动容限模版

▼表6 TWDM-PON抖动产生需求

线路速率/(Gbit/s)	测量带宽(-3 dB 频率 转折)高通带/kHz	测量带宽(-3 dB 频率转折) 低通带(-60 dB/dec)/MHz	峰峰幅度比(Ulpp)
2.488 32	5	20	0.30
	1 000	20	0.10
9.953 28	20	80	0.30
	4 000	80	0.10

NG-PON2的标准化工作目前先行一步,希望可以在NG-PON2时代通过全球统一的标准整合产业研发方向,降低网络部署成本。2014年和2015年,NG-PON2标准是ITU-T SG15的重要工作内容,包括G.989.3在内的NG-PON2系列标准将逐步完善。

### 参考文献

- [1] World Broadband Statistics - Point Topic [EB/OL]. [2014-07-01]. <http://www.docin.com/p-753612695.html>.
- [2] ITU-T. ITU-T R1.4. Full-service access network white paper: Next-generation 2 access network technology [S]. ITU-T. 2012.
- [3] ITU-T. ITU-T G.989. TD 199 R2 (PLEN/15) Draft Recommendation [S]. ITU-T. 2012.
- [4] ITU-T. ITU-T G.989.1. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements [S]. ITU-T. 2013.
- [5] ITU-T. ITU-T G.989.2 (for reinitiation of AAP). ITU-T TD 170 Rev.2 (PLEN/15) Draft new Recommendation [S]. ITU-T. 2013.
- [6] ITU-T. ITU-T G.989.3. ITU-T TD 200 Rev.1 (PLEN/15) Draft new Recommendation [S]. ITU-T. 2013.
- [7] ITU-T. ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid [S]. ITU-T. 2012.
- [8] ITU-T. ITU-T G.698.3. Multichannel seeded DWDM applications with single-channel optical interfaces [S]. ITU-T. 2012.
- [9] IEEE. IEEE Std 802.3-2008. Carrier sense multiple access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications [S]. IEEE. 2008.
- [10] IEEE. IEEE Std 802.3av-2009. Physical Layer Specifications and Management parameters for 10Gb/s passive Optical Networks [S]. IEEE. 2009.

- [11] ITU-T. ITU-T G.984.2. Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification [S]. ITU-T. 2003.
- [12] CPRI. CPRI Interface Specification V6.0. Common Public Radio Interface [S]. CPRI. 2013.
- [13] ITU-T. ITU-T G.989.1. ITU-T TD 185 (WP 1/15): Report of the Q2/15 meeting [S]. ITU-T. 2013.
- [14] ITU-T. ITU-T G.989.1. ITU-T TD 184 (WP 1/15): Draft Amendment 1 to Recommendation [S]. ITU-T. 2013.
- [15] ITU-T. ITU-T G.989.2. ITU-T TD 112 (WP 1/15): Living list [S]. ITU-T. 2013.

### 作者简介



**程强**, 工业和信息化部电信研究院研究生部信息与通信系统专业硕士毕业; 工业和信息化部电信研究院通信标准研究所高级工程师, ITU-T SG15中国专家组成员; 从事宽带接入网络和宽带IP技术的研究; 已发表科技论文10余篇。



**苟书奇**, 北京理工大学信息与通信工程专业硕士毕业; 工业和信息化部电信研究院通信标准研究所工程师; 从事PON技术的标准研究及PON协议的逻辑开发和系统测试。

# 软件定义光接入网

## Software-Defined Optical Access Networks

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0038-004

**摘要:** 提出一种基于软件定义的光接入网架构,可提升网络资源利用率,实现业务灵活接入与高效智能调度。该架构通过采用软件定义的光接入设备,可使接入网具备控制集中化、资源虚拟化、业务服务化等特点,进而降低网络运维成本,提升用户终端体验,为构建下一代简单、弹性、智能光接入网提供技术手段。

**关键词:** 软件定义网络;光接入网;智能网络

**Abstract:** In this paper, we propose software-defined optical access networks architecture, which can improve resource use in an optical access network. This architecture enables flexible service access and highly efficient scheduling. With this technology, we can make the network with centralized control, resource virtualization and business services. In this way, network construction costs can be reduced, and user terminal experience can be improved. This also promotes simple, intelligent next-generation optical access networks.

**Key words:** software defined network; optical access network; intelligent network

赵永利/ZHAO Yongli

吴家林/WU Jialin

张杰/ZHANG Jie

(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 Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

当前,由各种智能终端设备、各种云服务、以及庞大的光纤网络和无线通信网络共同构成的全球互联网爆发式发展,极大地刺激了网络业务的日益多样化与复杂化。同时随着用户对综合业务通信需求的与日俱增,以及定制化、差异化需求的出现,光网络的数据转发面临着超长距离、超大容量、超高速率的方向发展,控制管理面则朝着智能灵活、软件定义、用户交互、安全可靠、高效节能的方向发展。开放化和低成本成为未来网络发展的核心目标。

同时随着互联网 OTT (Over The Top) 厂商的兴起,传统网络运营商逐步“被管道化”,面临“剪刀差”<sup>[1]</sup>困

境。光接入网作为用户接入互联网的第一道门户,是用户网络体验的核心,是联系业务与用户的纽带。随着互联网服务驱动网络架构的变革,人们对光接入网提出了新的要求,需要进一步具备智能、开放、服务化等特点,而传统的光接入网架构与技术难以满足需求。

软件定义网络(SDN)是一种新型的网络架构,旨在将网络的控制与转发相分离,并对底层设备实现可编程化控制,从而达到网络开放与灵活配置的目标。SDN从架构上打破了传统依赖专有网元形成的封闭、僵化的控制体系,降低了设备生产的成本,并简化了运营,提高了网络运维的效率<sup>[2]</sup>。目前SDN技术在光网络中的应用也得到广泛的关注,并形成了系列关键技术<sup>[3-5]</sup>。

SDN技术为光接入网的发展提

供了新的思路,如控制与转发分离、虚拟化以及集中控制等特点,使光接入网设备逐渐具备智能控制功能,进而支持由多台设备协同组网,提供集成服务的能力<sup>[6]</sup>。本文提出了基于SDN的光接入网架构,并对其涉及的关键技术进行了分析,设计了软件定义光接入网的典型应用场景。

### 1 软件定义光接入网架构

软件定义光接入网架构如图1所示,包括应用平面、控制平面、设备平面3个平面。

设备平面指底层网络设备,“傻瓜化”硬件只保留数据的转发、策略的执行。传统的路由计算、策略的分析生成功能上移到控制平面,设备平面通过集成 OpenFlow 协议向控制平面提供可编程接口<sup>[7]</sup>。目前设备平面与控制平面主流的通信协议是 OpenFlow 协议。

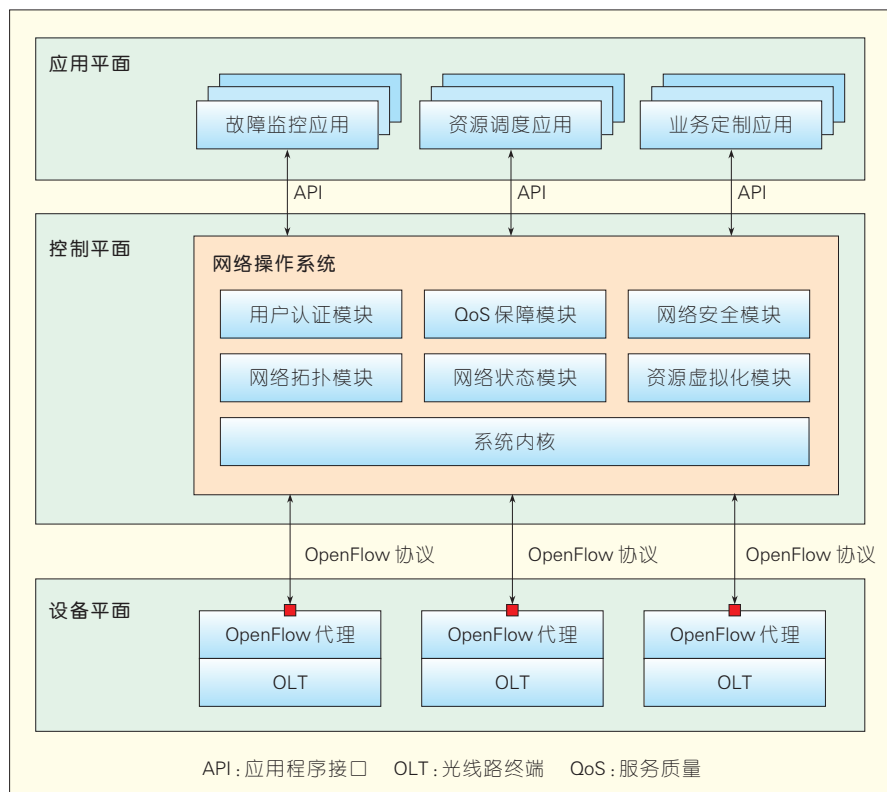
控制平面主要包括网络操作系统,其中系统内核提供基础的协议通信、系统服务管理。在网络操作系统中,以网络服务的形式完成控制平面的网络核心控制功能,比如网络拓扑结构、网络状态信息、异构网络虚拟

收稿日期: 2014-07-03

网络出版时间: 2014-08-21

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA011301)





▲ 图1 软件定义光接入网架构

化、用户认证、服务质量(QoS)保障、安全等模块。

应用平面通过控制平面向应用编程接口(API)接口实现更加复杂的应用层功能,如故障监控、资源调度、业务定制等应用。

软件定义光接入网通常具有如下特点:

#### (1) 控制集中化

随着对下一代互联网研究的深入,近年来软件定义网络成为国内外研究的热点<sup>[7-8]</sup>,软件定义网络实现了网络基础设施资源的集中可编程控制,通过控制器的集中管理,使网络策略可编程控制、网络资源可最优化分配。

集中式的控制架构,将数据转发层和控制层分离,接入节点的控制功能集中到控制器,通过硬件开放的可编程接口实现接入网节点“傻瓜化”,网络运维管理“集中化”,赋予网络运营商资源调配的灵活性,既可以减小网络运营者的管理成本,又可以让网

络更敏捷。

#### (2) 资源虚拟化

光接入网技术标准复杂,异构网络之间资源粒度和管理方式差异性较大,传统的接入网运营方式都是以家庭物理端口为单位,导致资源利用率低,资源调度困难等问题,基于软件可编程的虚拟化资源抽象机制,可以为网络控制层提供统一抽象的资源接口,实现全网资源的统一管理、灵活调度,提升资源利用率,增强用户体验,降低网络运营成本。

#### (3) 业务服务化

随着三网融合以及VoIP、IPTV等业务普及,接入网需要具备全业务运营的能力,并且需要根据不同的业务需求与用户需求采用不同的QoS与管理策略<sup>[9]</sup>。这在一定程度上加大了网络的管理运营难度,但是受到传统人工或半人工管理模式限制,传统的光接入网资源管理存在一定的局限性,同时也不能实时满足业务动态变化的需求。

软件定义光接入网通过集中式控制器统筹全网资源,实时调度网络资源满足业务多样化需求,同时开放式网络架构为应用层提供统一抽象的接口,简化网络应用的部署,加速网络创新。

## 2 软件定义光接入网关键技术

软件定义光接入网主要包括如下关键技术:

#### (1) 网络集中式控制技术

软件定义集中控制网络将底层异构的物理网络抽象成统一的接口,以供上层应用进行统一的调度和管理。具体来讲,可以将传统的控制平面划分为两部分,一部分功能是与业务控制紧耦合,包括各种丰富的业务QoS策略和带宽资源配置策略。另一部分功能是与设备控制紧耦合,主要指实现数据传输必须具备的控制功能。其中,公共功能部分可从控制平面中分离出来,构成集中式的网络控制器,向下通过开放的接口协议与设备节点相连,向上作为网络操作系统,了解全网资源信息,支持全网业务策略,在此基础上可灵活实现控制平面功能的可重构性,能够很方便地扩展各种业务应用和网络运营功能。

#### (2) 网络资源虚拟化技术

由于诸多原因,光接入网标准复杂,技术与设备更新换代速度慢,直接导致光接入网成为一个复杂的异构网络,利用软件定义统一控制架构可以解决不同类型网络的互连互通问题。然而,异构网络资源的最优化利用<sup>[10]</sup>才是未来网络追求的最终目标,其以网络资源的虚拟化为实现基础。通过网络资源的虚拟化技术,可以实现异构网络资源的统一管理和灵活调度。

针对以上问题,以异构网络资源的高效利用为目标,实现异构网络资源的统一抽象机理与映射机制,首先需要归一化不同形态资源粒度,比如时分复用无源光网络(TDM-PON)以

时隙为粒度,波分复用无源光网络(WDM-PON)以波长为粒度等,然后研究网络资源调度算法和控制策略,通过集中式网络架构实时获取网络状态,结合资源分配策略达到全局最优利用。

资源虚拟化技术目的在于实现光接入网资源的灵活调度,全局高效分配。接入网最核心的资源就是带宽资源,传统的带宽资源分配技术,比如动态带宽分配机制,根据终端的带宽需求以及预先制订的策略实现了光接入网局部带宽灵活配置<sup>[11]</sup>。然而这种光线路终端(OLT)内部的动态带宽分配机制并不能满足整个光接入网带宽灵活配置需求。一方面,传统的动态带宽分配机制依赖人工预先制订的参数策略,只能实现一定范围内的灵活性,实时性差,无法动态满足终端带宽需求;另一方面,传统的动态带宽分配机制只局限在单个OLT内部,缺乏多个OLT之间的带宽灵活配置。

基于控制集中化和资源虚拟化的带宽分配技术将突破传统网络架构的限制,以即时网络状态为支撑,洞悉网络流量变化,以全局视角调度全网资源,实现网络资源的高效利用和网络设施的科学建设。

(3)业务灵活接入与服务质量保障技术

光接入网业务日益多样化,为了节省网络成本以及高效利用大容量PON网络,运营商希望PON能够承载更多的业务,比如P2P、IPTV、语音通话、无线backhaul等等<sup>[12]</sup>,而受限落后的网络业务QoS保障机制,运营商传统的运营方式无法满足业务定制化需求,逐渐沦为“管道”提供商,陷入“剪刀差”困境,如何向用户提供定制化业务,对实现光接入网智能化意义重大。

传统的光接入网标准对QoS做了相关的要求,包括对上行和下行业务流的业务分类,队列调度,带宽控制,保障在上行和下行方向均能根据服

务等级协议(SLA)提供各种优先级业务的QoS<sup>[13]</sup>。满足了光接入网承载多种业务的能力,能够根据预先人工制订的策略针对不同的业务应用不同的QoS,即在目前的技术框架下,网络运营商可以通过网管软件人工实现业务QoS的固定设置,但是人工网管式的QoS管理技术有很多致命缺陷,无法满足日益增长的定制化需求。一是用户的需求时刻在变化,人工固定式管理交付速度慢,以天为计量单位<sup>[14]</sup>,无法满足迅速发展的网络可定制化的快速交付能力需求;二是人工网管制订的策略无法考虑到网络的实时状态,势必造成策略的局限性,只能根据过去的统计数据或者最坏情况去制订相关策略,没有合理地调度网络资源;三是人工网管式管理技术是分布式的,缺乏保障而且运营成本很高,网络信息和策略的汇聚和执行速度慢<sup>[15]</sup>,缺乏集中式全局视角和统一的业务交付平台,不能有效的利用网络资源向内容服务商和用户提供定制化业务。

软件定义网络将控制平面与数据转发平面分离,并通过API接口实现硬件可编程,为实现敏捷QoS控制机制提供可能。

为了统一高效的业务流管理,本文基于OpenFlow提出了Service-Flow控制机制,将传统的光接入网业务管理简化为PON设备根据控制器下发的Service-FlowTable匹配业务以及执行相应的QoS策略。PON设备将无法识别的业务上报给控制器,控制器通过下发Service-FlowTable自定义地修改业务QoS控制策略,Service-FlowTable包括业务匹配域、端口匹配域和自定义策略域。基于软件实现的控制器支持快速迭代开发,不断支持新业务以及新策略。

灵活的QoS保障技术为快速业务定制提供可能,业务定制层以应用形式部署在SDN应用平面,企业用户或管理员可以通过业务定制层提供的简单交互界面随时开通或修改定制

业务服务,业务定制层实时更新定制业务库。业务QoS保障模块部署在控制平面,根据实时更新的业务策略与网络实时状态制订最佳的业务QoS优先级及带宽分配信息,控制平面与设备平面的通信协议基于标准的OpenFlow协议针对接入网进行适配。在设备平面中,将OpenFlow协议代理嵌入到底层接入网设备中,实现硬件可编程。

### 3 软件定义光接入网的应用场景

软件定义光接入网主要有如下应用场景:

#### (1)全局可视化运维新模式

依赖于SDN的集中控制网络架构,将大幅简化网络运维复杂度,光接入网设备完全可以做到即插即用,而且网络故障的维护变为简单的硬件更换。

对于故障诊断方面,可以通过上层应用生成自动化的测试用例,通过集中控制器进行网络质量测试,并且可以任意指定测试的覆盖率等参数,相比传统测试仪器,不受地理位置的限制,更加快捷高效,并在用户发现问题之前就能发现网络故障以及性能瓶颈问题,提前解决问题,提高用户体验。

软件定义光接入网实现了可管、可视、可扩展的高效运维平台,打造网络资源与业务质量全局可视化的新运维模式,并且为业务升级和网络规划提供即时数据支撑,大大促进了业务创新进程。

#### (2)面向用户的网络资源分配

传统的接入网都是按照家庭物理端口为单位分配资源,没有统一的用户账号系统,落后的资源分配方式已经满足不了时代的发展,无法满足用户在任何地方享受同一标准的网络服务,而当前用户对于资源的灵活性需求越来越高;另一方面传统的基于物理端口的分配方式资源利用率低,在一个比较大范围的地理区域,

总人口可以认为是相对固定的,但是人口流动性很大,同时总带宽需求是比较稳定的,也就是网络流量在不断迁移,而网络带宽却是固定的,为了满足网络流量的峰值和用户体验,必然造成网络带宽资源的极大浪费。如何让网络带宽随着网络流量的迁移而动态分配,是一个亟待解决的技术难题,传统的光接入网技术只能解决单一设备或者局部的资源分配,在更大范围的网络规模上,还没有可行的技术方案。

软件定义光接入网采用集中式控制架构,为全局资源最优化提供技术支撑,中央控制器掌握所有底层设备的实时流量信息和带宽资源分配,全局动态分配带宽,再加上应用层的用户集中认证应用,可以实现接入网中面向用户的带宽分配机制,用户只需要购买一个账号就可以在任何网络覆盖的地方享受完全一样的有保障的网络服务,运营商也可以最大限度的提高网络资源利用率,大幅降低运营成本。而且用户账号系统是大数据时代的基石,有了账号才能区分用户行为,大数据才有意义,进一步可以提供更个性化的网络服务。

### (3) 业务服务定制接入网络

现在 OTT 业务面临差异化服务的需求,服务定制将确保面向用户的服务质量<sup>[12]</sup>。

2014 年召开的中国未来网络产业高峰论坛上,刘韵洁院士提出了服务定制网络(SCN)的理念。阐释了未来网络发展趋势:网络控制与数据交换分离,强大的网络资源调度控制能力,网络为内容提供服务。同时这也是光接入网的发展趋势,软件定义光接入网将成为服务定制网络的接入门户。

互联网发展冲击着传统运营商网络,呈现出业务多样化趋势,因此要求网络具有区分服务的能力。而接入网是端到端区分服务能力的瓶颈,基于软件定义光接入网灵活的控制架构,利用业务灵活接入与 QoS 保

障技术,构建服务定制网络的入口,打造共赢生态圈,对下一代光接入网的发展具有战略意义。

## 4 结束语

软件定义光接入网是接入网领域带宽提升之外的一个新兴而且重要的研究方向,具有很大的研究价值和产业空间。本文围绕光接入网控制集中化、资源虚拟化、业务服务化的新需求,从软件定义的视角研究集中式控制网络体系结构及构建方法,资源虚拟化抽象机制,以及定制业务 QoS 保障技术。在 OTT 业务和运营商的双重推动下,软件定义光接入网的应用将会成为未来接入网技术主流之一。

### 参考文献

- [1] 吴家林,赵永利,张杰,顾晓仪. 网络革命拂晓: SDN 进入智能宽带接入网 [J]. 通信世界, 2013, 41(7): 49-50.
- [2] 赵慧玲,冯明,史凡. SDN——未来网络演进的重要趋势 [J]. 电信科学, 2012, 28(11): 1-5.
- [3] 张杰,赵永利. 软件定义光网络技术与应用 [J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(3): 22-26.
- [4] CHANNEGOWDA M, NEJABATI R, SIMEONIDOU D. Software-defined optical networks technology and infrastructure: enabling software-defined optical network operations [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5 (10): A274-A282.
- [5] JI P N. Software defined optical network [R]. ICOCN, 2012.
- [6] 王茜,赵慧玲,解云鹏等. SDN 在通信网络中的应用方案探讨 [J]. 电信网技术, 2013, 32(3): 23-28.
- [7] de LAAT M M, DUIJN R L, PLUK E G C, et al. FlexPON: a Hybrid TDM/WDM Network enabling Dynamic Bandwidth Reconfiguration using Wavelength Routing [C]//Proceedings of the Optical Communication, 35th European Conference on. IEEE, 2009: 1-1.
- [8] CVIJETIC N, TANAKA A, JI P N, et al. First OpenFlow-based Software-Defined  $\lambda$ -Flow Architecture for Flex-Grid OFDMA Mobile Backhaul over Passive Optical Networks with Filterless Direct Detection ONUs [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2013.
- [9] PAROL P, PAWLowski M. Towards networks of the future: SDN paradigm introduction to PON networking for business applications [C]//Proceedings of the Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2013 Federated Conference on. IEEE, 2013: 829-836.
- [10] SGAMBELLURI A, PAOLUCCI F, CUGINI F, et al. Generalized SDN control for access/metro/core integration in the framework of

the interface to the Routing System (I2RS) [C]//Proceedings of the GlobeCom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE. IEEE, 2013: 1216-1220.

- [11] BITAR N. SDN and Potential Applicability to Access Networks [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2014: Th1G.4.
- [12] CHANNEGOWDA M, NEJABATI R, SIMEONIDOU D. Software-defined optical networks technology and infrastructure: enabling software-defined optical network operations [J]. Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal, 2013, 5(10): A274-A282.
- [13] KANONAKIS K, CVIJETIC N, TOMKOS I, et al. Dynamic software-defined resource optimization in next-generation optical access enabled by OFDMA-based meta-MAC provisioning [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2296-2306.
- [14] BREWKA L, GAVLER A, WESSING H, et al. Proposal of QoS enabled GMPLS controlled XG-PON [C]//Proceedings of the Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on. IEEE, 2011: 1-6.
- [15] SHAW W T, WONG S W, HSUEH Y L, et al. End-to-End QoS of Video Streaming Service on Joint SUCCESS DWA PON and Modified RPR Network [C]//Proceedings of the Broadband Communications, Networks and Systems, BROADNETS 2006. 3rd International Conference on. IEEE, 2006: 1-7.

### 作者简介



**赵永利**, 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院讲师、博士; 主要研究领域为智能宽带网和网络资源虚拟化; 已主持和参加基金项目 5 项; 已出版学术专著 2 部, 发表 SCI/EI 检索论文 150 余篇。



**吴家林**, 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院在读硕士研究生; 主要研究领域为软件定义网络、光接入网; 已参加基金项目 2 项。



**张杰**, 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授、副院长; 主要研究领域为光网络体系结构、控制管理和协议标准; 已主持基金项目 6 项; 已出版著作 8 部, 发表论文 300 余篇, 其中被 SCI/EI 检索 200 余篇。



# 软件定义光网络的机遇与挑战

## Software-Defined Optical Networks: Opportunities and Challenges

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0042-03

**摘要:** 提出软件定义光网络(SDON)是一种将软件定义技术融入到光通信网络的新型网络,代表了未来的光网络发展方向,其关键技术涉及到软件定义光传输、交换和联网等,其主要特征包括控制面与传送面分离、硬件通用化、协议标准化、光网行为软件可控、光网应用灵活快捷等。SDON在支撑新一代光网络向智能高效、灵活调度、虚拟重构等方向发展进程中将发挥重要作用,应用前景广阔,但目前尚处在发展初级阶段,仍面临很多挑战和问题。

**关键词:** 光网络; 软件定义; 传输; 交换; 联网

**Abstract:** A software-defined optical network (SDON) is a new kind of network in which software-defined technology is integrated into optical communication networks. This is a promising trend for future optical networks. The key technologies are related to software-defined optical transmission, switching, and networking. The main features are control and transport separation, hardware universalization, protocol standardization, controllable optical network operation, and flexible optical networks application. SDON will play an important role in the development of next-generation intelligent optical networks forwards to high efficiency, flexible scheduling, and virtual reconstruction. However, there are many challenges and problems for SDON in the primary stage.

**Key words:** optical networks; software defined; transmission; switching; networking

纪越峰/JI Yuefeng

(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 Lab of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

- SDON 更加适合多层域、多约束的光网络控制, 可有效提高运维效率和降低成本
- SDON 如何与数据 SDN 的跨层协同和相互配合, 实现物理上的融合和控制上的互通, 是目前难点之一
- SDON 全面发展的步伐, 最终由市场应用决定

软件定义网络(SDN)是业界近期的热点话题之一,而光层上的软件定义网络称为软件定义光网络(SDON),同样引起了人们的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。在2014年3月举行的全球光纤通信大会(OFC 2014)上,业界专家将SDON列为了首选焦点话题,可见其影响力之大。

### 1 SDON 的出现

随着网络新业务的不断涌现,各种信息交互量与日俱增,对于传送业

务的光网络而言,满足高速、宽带、长距的超大容量传送需求是其追求的永恒主题。但同时由于业务属性的变化,尤其是业务的多样性、动态性和突发性,对光网络的智能性提出了新挑战,如高突发业务要求光网络具备动态适应能力,大规模联网要求光网络具备灵活扩展能力,变带宽提供要求光网络具备弹性调节能力等。

为实现智能光网络,业界开展了长期的探索与实践。到目前为止,智能光网络已经历了3个重要的发展阶段(图1)。

(1) 自动交换光网络(ASON)的提出(2000年)。

ASON首次将光网络分成传送、

控制、管理3个平面,并通过引入控制平面(以GMPLS协议为基础),采用分布信令/分布路由方式,重点解决连接控制等难题,以满足自动交换的功能需求<sup>[6-9]</sup>。但由于ASON在大规模连接控制、复杂路径计算、网络开放性、设备互通性、以及降低成本等方面存在局限性<sup>[10]</sup>,而且GMPLS的标准也过于庞杂,因此ASON在应用推广上受到较大影响。

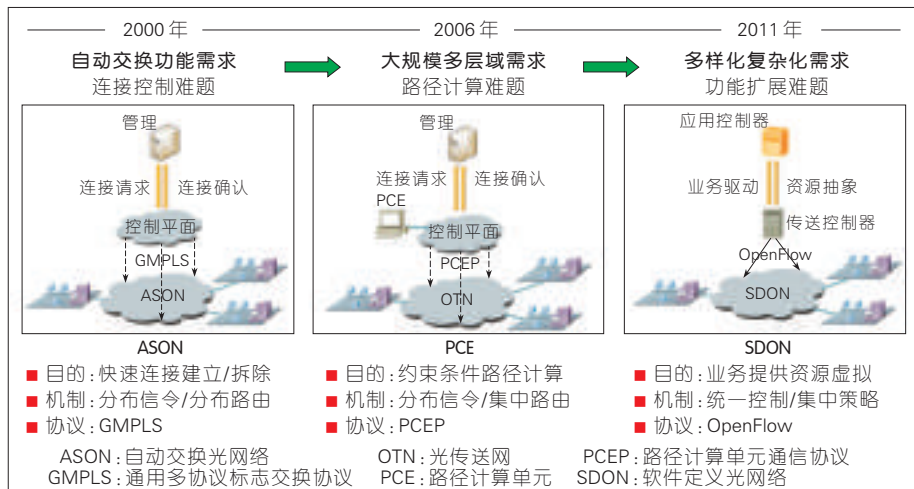
(2) 基于路径计算单元(PCE)光网络的提出(2006年)。

为更好地适应多层多域大规模光网络的特点,互联网工程任务组(IETF)将路径计算功能从控制层分离出来,以独立的单元形态即路径计

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA011300)

收稿日期: 2014-07-16

网络出版时间: 2014-08-27



▲ 图1 智能光网络的演进

算单元出现<sup>[11-14]</sup>。PCE采用分布信令/集中路由方式,重点解决受约束的层间和域间路径选择与计算的难题,以满足大规模多层域的功能需求。但PCE主要定位于路径计算,功能比较单一,并且还需要与其他技术协同应用。

### (3) SDN的提出(2011年)。

SDN可以为各种光层资源提供统一的调度和控制能力,根据用户或运营商需求,利用软件编程方式进行动态定制,重点解决功能扩展的难点,从而实现快速响应请求、高效利用资源、灵活提供服务的目的,满足多样化复杂化的需求。SDN的主要特征在于其支持业务处理、控管策略和传输器件具备可编程控制的能力,从而完成光网络元素状态的可编程调谐<sup>[15]</sup>,因此SDN更加适合多层域多约束的光网络控制,可有效提高运维效率和降低成本。

## 2 SDN带来的技术进步

SDN的技术特征主要表现为光路传输调节可编程、光路灵活交换可编程、光路自动联网可编程等方面<sup>[4]</sup>,具体表现为:

- 光路传输调节可编程。通过光收发机波长、输入输出功率、调制格式、信号速率以及光放大器的增益范围等参数的在线调节,使得光路可

以成为一个物理性能可感知、可调节的动态系统。

- 光路灵活交换可编程。通过支持灵活栅格的可编程可重构型光分插复用设备(ROADM)技术,打破了传统波长通道固定栅格划分,可支持全光汇聚与流量疏导,从而实现高谱效率、速率灵活的光路配置和带宽管理。

- 光路自动联网可编程。SDN能够实现异构设备的自动联网,通过将器件、算法、策略与协议进行可编程控制,完成异构网络资源统一控制与网络整体行为动态调谐,并且可以通过开放的北向接口支持多种灵活的业务应用。

我们可以从不同的视角来分析SDN的意义以及其技术进步给人们带来的影响:

- 传输视角。SDN可以支持光传输损伤感知与质量评估,支持光传输可调单元的参数选择,并且支持光传输的数字信号处理(DSP)算法性能控制。

- 应用视角。SDN可支持北向编程接口,结构开放便于提供新业务、支持资源分片组合,策略开放便于新业务区分。

- 网络视角。SDN可支持光网络的异构互联互通,支持光网络的统一控制调度,支持光网络的分层多域

优化,支持光网络弹性多约束路由与频谱分配(RSA),支持光网络灵活运维和升级,支持光网络层资源虚拟化,以提升资源利用效率。

## 3 SDN带来的市场新应用

面对网络结构、业务种类、带宽速率、成本效率等多方面的挑战,SDN能在一定程度上有效提升网络的综合性能,并能够降低成本、增加灵活和提升效率(C.A.P)(图2),下面通过3个案例说明SDN的优势。

- 在光接入、光传输、光交换、光联网等方面均可带来好的收益。例如:将OTN、ROADM等光设备采用统一灵活的节点架构,实现硬件处理通用化、软件控制功能化,可减少设备制造成本并降低运营商的网络建设成本和网络运营成本等。

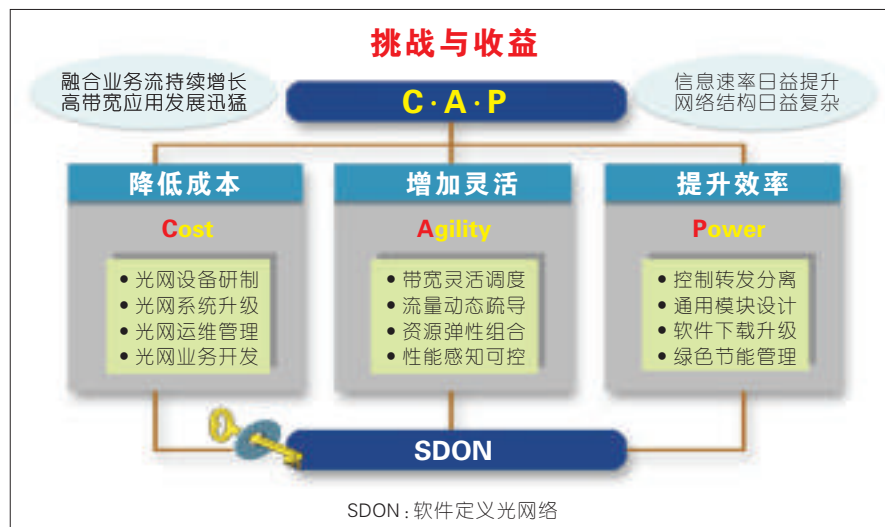
- 将网络应用开放化,可为数据中心定制光层流量均衡方案,为虚拟运营商提供光虚拟专网(OVPN),为新业务部署提供即时带宽,为企业和个人客户灵活定制网络业务生成环境等。

- 将光层器件和设备可软件编程控制,实现自定义速率与码型等,可为业务应用提供弹性管道,提升网络运营效率,同时也便于实现网络与设备的可扩展与平滑升级。

## 4 SDN面临的问题与挑战

SDN作为一项新技术,目前处在发展的初级阶段,会面临诸多问题,尤其是在光层上实现“可编程控制与资源虚拟化”更具有挑战性。

- 光层与电层属性不同,并且粒度多样,分层多域,异构互联,因此光层SDN与数据SDN不存在一一对应关系,也无法全部照搬,因此SDN要对目前常规数据SDN进行扩展,以满足光网络在异构性和复杂性方面的特殊需要。例如:不同传送体制下光层资源的差异化,不同结构下路由计算的限制性以及不同层域下连接控制方式的复杂性等。因此,简单地将



▲图2 SDN的收益

数据SDN思路与技术移植到光网络中难以解决光网络中的异构互联、扩展性、灵活性和平滑升级等关键问题,需要为SDN开发出完全适用于光网络的体系和相关协议。

• SDN光层硬件抽象复杂,不仅需要完成端口的抽象,还需要完成传送、交换等多种类型硬件的抽象以及光层带宽资源的提供,技术实现比较困难。

• SDN控制器作为核心部件之一,如何实现底层器件的可控性与上层应用的开放性,如何实现大规模集中式控管环境下的快速准确性,以及自身的安全性和可靠性,都是尚待研究与实现的问题。

• SDN如何与数据SDN跨层协同和相互配合,实现物理融合和控制互通,目前也是个难点。

## 5 结束语

基于上述分析,可以得出以下几个结论:

(1)光层智能是大势所趋,传送网变革也势在必行,从ASON到PCE,再到目前的SDN,技术在不断演进与发展,光网正逐渐从单纯粗放性扩容到与精细化处理并举的方向演变,预期SDN将给未来光网络带来变革,这种变革体现在降低成本、增加

灵活、提高效率、开放快捷等方面。

(2)SDN的技术实现,在很大程度上取决于核心部件的支撑,有了智慧型的“大脑”,还要拥有可调可控的灵活“四肢”,并能实现高效的协同工作,这在目前尚未突破。

(3)要想实现SDN的全部理念,尚待时日,除关键技术以外,各厂家设备的壁垒、运营商的管理模式、与现网的关系、大规模集中控管带来的风险等都是具有挑战性的问题。

(4)SDN中的局部技术也许会率先应用(如软件定义光传送设备的性能提升),但其全面发展的步伐,最终由市场应用决定,尤其取决于在“光层”上的业务应用突破,以及跨层全网SDN的彼此协同和各类资源的统一协调。

(5)在“构建开放光网环境”的理念驱动下,实现光网行为软件可控与光网应用灵活快捷等,代表了未来的光网络发展方向,应用前景广阔。

## 参考文献

- [1] CHANNEGOWDA M, NEJABATI R, SIMEONIDOU D. Software-defined optical networks technology and infrastructure: Enabling software-defined optical network operations [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5 (10): A274-A282.
- [2] Software-Defined Networking for Transport Networks[EB/OL].http://www.advaoptical.com

- [3] PHILIP N Ji. Software defined optical network [C]//2012 11th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Chonburi, Thailand, 2012: 1-4. doi: 10.1109/ICOON.2012.6486241.
- [4] 张杰,赵永利. 软件定义光网络技术与应用[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19 (3): 17-20. doi: 10.3969/j.issn.1009-6868.2013.03.004.
- [5] ELBERS, J.-P., AUTENRIETH A. From static to software-defined optical networks [C]// 2012 16th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Colchester, 2012: 1-4. doi: 10.1109/ONDM.2012.6210207.
- [6] ITU-T G.8080/Y.1304 Architecture for the automatically switched optical network (ASON) [S]. 2006.
- [7] ALANQAR W. Requirements for generalized MPLS (GMPLS) routing for automatically switched optical network (ASON) [S]. IETF draft, 2005.
- [8] PAPADIMITRIOU D. Requirements for generalized MPLS (GMPLS) signalling usage and extensions for automatically switched optical network (ASON) [S]. IETF draft, 2005.
- [9] SHIOMOTO K. Requirements for GMPLS-based multi-region and multi-layer networks (MRN/MLN) [S]. IETF draft, 2006.
- [10] Ji Yuefeng, REN Danping, LI Hui, LIU Xuejun, WANG Zhengzhong. Analysis and experimentation of key technologies in service-oriented optical internet [J]. Science in China Information Sciences, 2011, 54 (2): 215-226. doi: 10.1007/s11432-010-4168-5.
- [11] FARREL A, VASSEUR J.-P, Ash J, Ed.. RFC4655 A path computation element (PCE)-based architecture [S]. 2006.
- [12] Ash J, Ed, LE ROUX J L, Ed. RFC4657 Path computation element (PCE) communication protocol Generic Requirements [S]. 2006.
- [13] LE ROUX J L, Ed. RFC4674 Requirements for path computation element (PCE) discovery [S]. 2006.
- [14] LE ROUX J L, Ed. RFC4927 Path computation element communication protocol (PCECP) specific requirements for inter-area MPLS and GMPLS traffic engineering [S]. 2007.
- [15] ZHANG Jie, YANG Hui, ZHAO Yongli, Ji Yuefeng, et al. Experimental demonstration of elastic optical networks based on enhanced software defined networking (eSDN) for data center application [J]. Optics Express, 2013, 21 (22): 26990-27002.

## 作者简介



纪越峰,北京邮电大学教授、博士生导师,国家“973”计划项目首席科学家,国家“863”计划项目首席专家,北京邮电大学信息光子学与光通信研究院执行院长,国家重点实验室常务副主任;研究方向为宽带网络与光波通信;研究成果先后获得国家技术发明奖二等奖、国家科技进步奖二等奖、国家级教学成果奖二等奖等。



# EV-DO 网络承载小流量长在线业务的性能分析及优化

## Performance Analysis and Optimization of EV-DO Networks Supporting the Always-On Services of Little Traffic

**摘要:**分析了小流量长在线业务对 EV-DO 网络的影响,同时提出了一种业务接入控制的数学模型。通过仿真,得出了 DO 网络承载小流量长在线业务的网络性能优化方法,该优化方法能提升无线网络性能,接入更多用户。并从终端、网络、业务平台各个环节提出专为小流量长在线业务而优化的解决方案。

**关键词:** 即时通信;物联网;小流量长在线业务;接入控制;性能优化

**Abstract:** In this paper, we discuss the effect of the always-on services of Little Traffic on EV-DO networks and propose a mathematical model for service access control. Through simulations, we create some methods for optimizing network performance, radio network performance, and access for users. Finally, we propose some optimization solutions the always-on services of little traffic.

**Key words:** instant message; internet of things; always-on services of little traffic; access control; performance optimization

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0045-05

随着 3G 网络的日益完善及广泛覆盖,移动互联网业务进入发展的快车道,智能手机已成为人们生活的基本配置。与此同时,物联网的蓬勃发展将移动互联网领域从人拓展到机器。移动互联网在满足人们随时随地接入互联网的便捷性要求的同时,更为重要的功能是为人们提供广泛多样的社交沟通方式,如手机 QQ、微信、手机微博等即时通信(IM)类应用。

智能手机这种“永远在线”的业务体验需求给 3G 网络带来了巨大的冲击。最典型的例子是 2012 年 1 月 25 日发生在日本最大的移动运营商

NTT DoCoMo 大面积网络瘫痪事故。故障持续近 5 个小时,而这已经是 DoCoMo 在过去 6 个月出现的第 5 次网络问题。美国 AT & T、欧洲 Orange 等一些知名的电信运营商近年来都曾经遭遇过类似的、严重的网络瘫痪的情况,给人们的生活和工作带来了影响。

文章主要分析人们广泛使用的 IM 应用这类小流量长在线业务对 EV-DO 网络的影响。在对小流量长在线业务特征进行分析和现场试验的基础上,进一步梳理 DO 网络承载小流量长在线业务的实现机制,并提出了一种业务接入控制的数学模型,最后从终端、网络、业务平台各个环节提出专为小流量长在线业务而优

何晓明/HE Xiaoming  
曹维华/CAO Weihua  
贺晓东/HE Xiaodong

(中国电信股份有限公司 广东研究院,  
广东 广州 510630)  
(Guangdong Research Institute, China Telecom  
Corporation Ltd. Co, Guangzhou 510630, China)

化的解决方案。

### 1 小流量长在线业务特征

小流量长在线业务大体分为两类:人与人通信及机器与机器通信(M2M)。目前,中国的人与人通信的小流量长在线应用软件主要以 QQ、微信、微博为代表。据统计,校园学生中手机 QQ 和微信的渗透率达到 80% 以上,而普通用户中参与 QQ 应用的用户占比也达到 40% 左右;校园学生同时也是手机微博的主要使用群体,渗透率达到 50% 以上。M2M 应用是一种典型的小流量长在线业务,发展势头良好,是未来小流量长在线业务的潜在增长点。这两类小流量长在线业务的共同特征是数据传输的流量较低,但占用过多的无线资源,导致无线资源的使用效率低;同时频繁的连接激活与释放产生大量的信令开销,使无线网络的信令负荷不堪重负。小流量长在线业务特征可概括为以下几个方面<sup>[1]</sup>。

- 在线时间长。对于 M2M 应用,

收稿日期: 2014-07-05  
网络出版时间: 2014-09-04

因不同业务应用场景不同,业务在线时间也不尽相同,但总体在线时间较长。如在电力抄表应用中,电力公司为了实时了解电力抄表系统的工作状态,要求抄表终端 24 h 在线;环境监测系统也要求全天候上报监测点的温度和湿度情况;公交或出租车的车载终端全球定位系统(GPS)定位业务每天在线时长至少在 10 h 以上。而在手机 IM 的应用中,虽然不同个体间存在着使用习惯的差异性,但运营商普遍采用的按流量计费方式能够使得大多数用户的平均在线时间超过 8 h。

- 流量小。不同于上网下载这类大流量突发业务,大多数小流量长在线业务具有小流量突发的特点,即每次连接传输的数据量都很小。根据现场测试数据,车载终端 GPS 定位业务每次连接的前、反向数据量约为 800 ~ 860 Byte,前、反向速率均小于 4.8 kbit/s;手机 QQ 每次连接的前、反数据量约为 500 ~ 600 Byte,前、反向速率大部分接近 3 kbit/s。

- 连接次数高。对于车载终端 GPS 定位业务,人们需要实时了解车辆的轨迹和行踪,可根据车速情况调整 GPS 数据发送频度,若按平均每分钟上报一次数据计算,每小时建立的空口连接数约为 60 次;对于手机 QQ 业务,消息的发送频次取决于应用场景。在主流的 IM 软件中,由于中国使用 QQ 应用的用户渗透率最高,如此频繁的空口连接和释放对无线网络是一个挑战。

- 心跳周期短。为保持业务长时在线,大多数客户端软件都具有心跳机制,如较早版本的 QQ 客户端心跳周期为 30 s。

- 前、反向链路的占空比低。由于小流量长在线业务具有较强的间隙性传输数据的特点,一个小的突发数据过后,要经过一个较长的时间间隔才会传送下一个突发数据。根据现场测试数据,车载终端及手机 IM 应用大部分连接的占空比都低于

20%。也就是说,终端在提供小流量长在线业务的时候,大部分时间处在休眠状态,只有小部分时间在发送或接收数据。

## 2 EV-DO 网络承载小流量长在线业务的性能分析

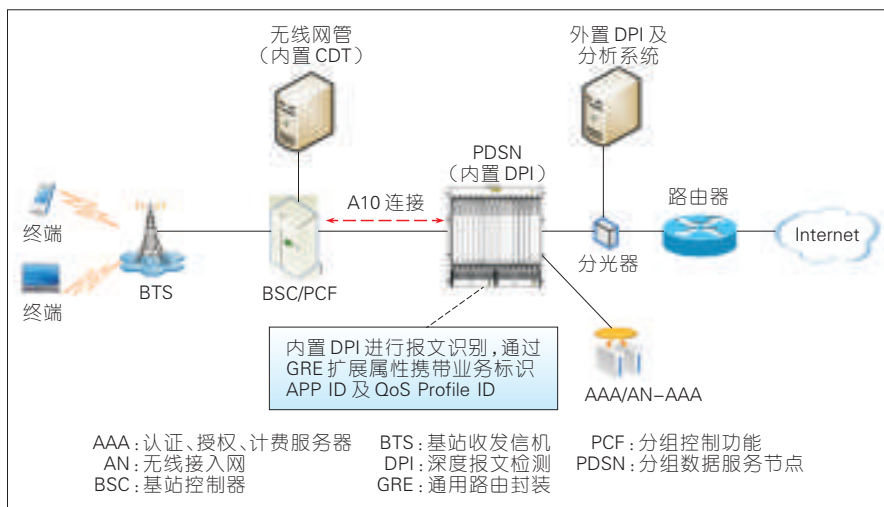
### 2.1 小流量长在线业务对 EV-DO 网络影响的现网试验

为了了解小流量长在线业务对 EV-DO 网络的影响程度,我们收集了大量已有的现网测试数据,并在江苏、四川等省份进行了现场试验,测试拓扑如图 1 所示。在现场试验中,连接分光器的外置深度报文检测(DPI)设备及后台分析系统主要用于采集分析移动互联网业务的流量组成、小流量长在线业务在整个移动互联网流量占比以及参与小流量长在线业务的用户占比情况。核心网分组域使用中兴通讯的分组数据服务节点(PDSN)设备,通过内置 DPI 模块对下行的 IP 报文进行识别和标识,在 A10 连接中通过通用路由封装(GRE)头部扩展属性携带业务标识 APP ID 及业务 QoS 等级 Profile ID,并传递到无线侧的基站控制器/分组控制功能(BSC/PCF)。中兴通讯的无线网管内置呼叫话单统计模块(CDT)实现基于业务的无线资源占用统计和分析,

它能够统计到每个连接的时长、前、反向流量以及业务属性。根据 CDT 统计数据,人们能够得到各种业务所产生的连接数、连接时长以及流量情况。现场试验结果发现由 IM 应用产生的无线连接数占有移动互联网业务连接数的 30% 左右,由 IM 应用产生的话务量占到所有移动互联网业务话务量的 25%,但 IM 应用所产生的前、反向流量却不到全网整个流量的 10%。也就是说,IM 这种小流量长在线应用占用了 DO 网络 30% 的信令负荷及 25% 的无线资源,但是运营商按流量计费这种商业模式使得 IM 应用只为电信运营商贡献了 10% 的业务收入。

### 2.2 小流量长在线业务对 EV-DO 网络的具体影响

到目前为止,中国电信还未发生因小流量长在线业务引起的大面积网络瘫痪现象,但是在部分高校、高密度写字楼等人群聚集的热点区域,接收到大量的用户投诉,主要表现为接入网络困难、频繁掉线、上网速率慢、甚至打不开网页等现象。通过无线网管数据分析得到:这些热点基站的忙时连接成功率、无线掉线率、连接数、话务量、反向链路的基底噪声(ROT)等指标偏离正常水平,但是忙时前/反向吞吐量、前向时隙占用率



▲ 图 1 现场试验测试拓扑

等指标并未表现异常,这表明这些问题基站并不是由于业务量过载引起的。我们对高校学生进行调研后发现,高校学生们普遍都喜欢使用QQ、微信、微博这类IM业务,尤其在一天之中的22:00—24:00时段使用最为集中。

在DO网络中,每载扇激活的用户数主要受前向MACIndex数量、反向信道单元(CE)数量以及反向ROT等参数的限制。前向MACIndex资源中,每载扇能用于业务信道的最大数是114个,考虑到软切换的需要,假设软切换因子为30%~40%,则前向业务信道MACIndex资源最大可用数约70~80个,再考虑30%的冗余(一部分用于控制信道包),实际可用于用户终端的数量约50~60个。反向CE数目受信道板硬件资源(如芯片)的限制,一般可通过硬件升级等方式提供更多的CE资源。

另一个限制每载扇激活用户数的重要因素是反向ROT指标。基站根据ROT来评估基站的干扰和负载情况。由于DO系统反向采用码分多址接入方式,所以反向干扰受限;反向ROT抬升,将造成基站反向覆盖的收窄,远点用户由于功率不足造成接入失败和掉话,从而影响用户感知。反向ROT值越高,意味着反向负荷越重。一个载扇下激活的用户数越多,反向干扰就越严重。现场测试数据发现,50部手机QQ主动通信时(每分钟发送1条消息),可将反向链路的底噪抬升3~5 dB,相当于消耗30%~70%的反向容量。这会严重影响其他用户的业务体验。

假设一个全向扇区下共有 $N$ 个用户, $V_{AF}$ 表示业务激活因子,每个用户的信号达到基站接收机时电平基本相等,并假设所有用户的反向平均速率为 $R$ ,系统扩频带宽为 $W$ ,每个用户解调信号所需的最小信干比为 $E_b/I_o$  [2]。在不考虑接收机本身热噪声的影响及周围小区对本小区的干扰时,则可以粗略得到:

$$N \approx 1 + \frac{(W/R)}{V_{AF} \times (E_b/I_o)} \quad (1)$$

考虑一个全向扇区接入的用户数远大于1,则根据公式(1),实际同时激活的用户数 $n$ 为:

$$n \approx \frac{(W/R)}{(E_b/I_o)} \quad (2)$$

在校园区域,由于大量学生在同一时间段频繁使用QQ或微信这类IM应用,容易形成聚集效应,过度占用无线资源,导致上述无线资源枯竭,网络性能急剧恶化,用户体验变差。另一方面,IM消息的频繁发送引起空口连接的频繁激活与释放,产生大量的信令开销,加重了控制信道的信令负荷。当控制信道发生信令拥塞时,信令开始丢弃,更有甚者,当信令风暴引起的大量突发的寻呼消息将使得基站控制器(BSC)的信令处理能力严重过载,最终引起大面积网络瘫痪。

### 2.3 小流量长在线业务对EV-DO网络影响的数学模型

假设某个载扇下接入 $n$ 个小流量长在线用户,每个用户平均1 h产生 $a$ 次呼叫,每次呼叫占用的平均空口连接时长为 $t$  s,则每个小流量长在线用户平均产生的话务量为 $(a \times t)/3600$  (Erl),在任意时刻每个用户占用空口资源的概率 $p$ 也为 $(a \times t)/3600$ 。可以合理地认为每个用户的行为是相互独立的,考察任意时刻有多少用户同时占用空口资源就成为经典的 $n$ 重伯努利试验<sup>[3-5]</sup>。

根据二项分布的相关定理,任意时刻有 $m$ 个用户同时占用空口资源的概率为:

$$b(m; n, p) = C_n^m p^m (1-p)^{n-m} \quad (3)$$

我们设定每载扇下同时激活的用户数极限为 $k$ ,则在任意时刻有不超过 $k$ 个用户同时占用空口资源的概率为:

$$\sum_{m=0}^k C_n^m p^m (1-p)^{n-m} \quad (4)$$

也就是说,根据给定的每载扇下同时激活的用户数极限 $k$ ,每载扇下接入的用户数 $n$ ,以及每用户平均话务量(即为用户平均占用空口资源的概率 $p$ ),由式(4)可以计算得到该载扇下小流量长在线用户的连接成功率指标。

在任意时刻超过第 $k$ 个用户的连接请求将被拒绝,因此根据上述条件,可得到该载扇下小流量长在线用户的连接失败率指标为:

$$1 - \sum_{m=0}^k C_n^m p^m (1-p)^{n-m} \quad (5)$$

以某个载扇下同时激活的用户数极限 $k=50$ 、接入的用户数 $n=200$ 为例进行仿真,图2给出了该载扇下每用户平均话务量与平均连接成功率的关系。

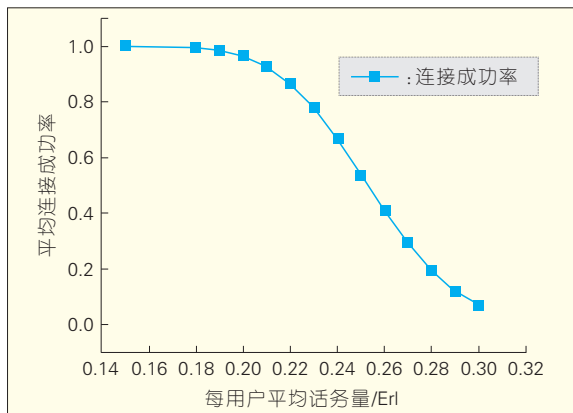
图2中,每用户平均话务量小于0.2 Erl时,载扇的平均连接成功率指标可维持在95%以上,但是当每用户平均话务量大于0.2 Erl时,每用户平均话务量的微小增加都会导致载扇下平均连接成功率的急剧下降。减少每用户平均话务量水平,可大幅提高载扇的平均连接成功率指标。

通过仿真,图3给出了在维持载扇下平均连接成功率为95%以上(不降低连接成功率指标),且并发连接数为50个时,每用户的平均话务量与每载扇下的接入用户数的关系。通过减少每用户平均话务量水平,可显著提高载扇的接入用户数<sup>[6]</sup>。

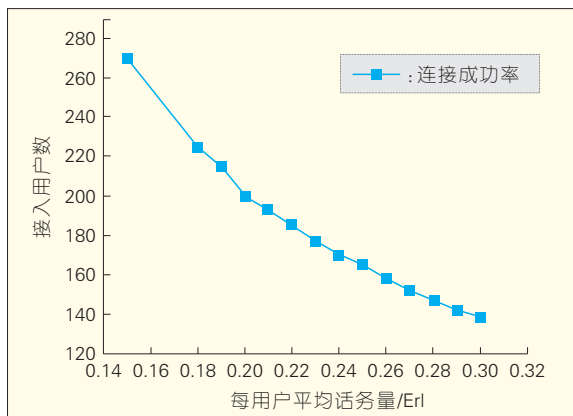
当每用户平均话务量(即用户平均占用空口资源的概率)不变,并维持载扇下平均连接成功率在95%以上时,进一步仿真分析载扇下接入用户数与并发连接数的关系。图4给出了用户平均占用空口资源的概率 $p=0.2$ 时载扇下接入用户数与并发连接数的关系。

可见,在保持平均连接成功率不变(95%以上)的前提下,减少每载扇下接入用户数可以显著降低该载扇

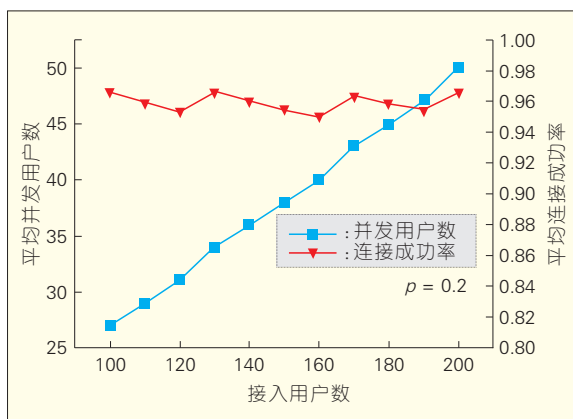




▲图2 每用户平均话务量与平均连接成功率的关系



▲图3 每用户平均话务量与每载扇接入用户数的关系



▲图4 载扇下接入用户数与并发连接数的关系

下的并发连接数,也即意味着可大幅降低 ROT 指标,提升网络反向容量,改善用户的业务感知。

### 3 小流量长在线业务的优化

根据上述分析,小流量长在线业务对 DO 网络的影响主要表现为 2 个

方面:

(1)空口连接时间长,造成对无线资源的过度占用,而每连接内传输的数据量小,无线资源使用效率低;(2)空口连接次数高,增加无线网络的信令负荷,容易引起信令风暴。

针对第 1 个问题,文章试图从终端、网络及应用平台 3 个方面提出最小化小流量长在线业务对空口资源占用的优化手段。对于第 2 个问题,主要通过改进 DO 网络的寻呼方式加以缓解,如基于业务的寻呼抑制技术、基于业务的寻呼优先级技术、基于路由更新(RU)寻呼技术等,在文章不做深入讨论。

#### 3.1 调整休眠定时器

在上述小流量长在线业务的接入控制数据模型中,若在不增加连接次数的前提下,减少每次连接的时长,可相应减少每用户平均产生的话务量水平,也就减少了任意时刻每个用户占用空口资源的概率,这样以来在每载扇同时激活的用户数极限及连接成功率指标不变的条件下,可提高每载扇接入用户数;另一方面,若维持每载扇的接入用户数及连接成功率指标不变,当每用户平均话务量减少时,每载扇同时激活的用户数

也会相应减少,意味着 DO 网络反向 ROT 值的下降,无线网络的前、反向吞吐量将得到提升,能有效改善其他用户的业务体验<sup>[7]</sup>。

对于 IM 这类小流量长在线业务,由于消息的传输具有较强的间隙性,一个小的突发数据过后,要经过

一个较长的时间间隔才传送下一个突发数据,表现为传输链路的占空比很低。若能在传送一个突发数据后立即释放空口连接,可大大减少这种小流量长在线业务对空口资源的占用时间。

休眠定时器就是终端和网络侧检测到空口连接空闲时(没有数据传输)释放该连接所需等待的时间。通过减少小流量长在线业务的休眠定时器可降低使用这类业务的话务量水平。休眠定时器设置得过长,会增加每次连接的空闲等待时间,反映在用户平均话务量的升高;休眠定时器设置得过短,虽然会降低话务量,但可能会引起连接次数的增加,产生更多的信令开销。因此,调整休眠定时器需要权衡话务量与信令负荷两者的关系,不适合在信令负荷较高的网络中实施。

以休眠定时器的最短极限 3 s 为例,定义小流量长在线业务的一个消息突发为一串间隔小于 3 s 的连续收发数据包,每个消息突发之间的间隔称为消息突发间隔。假定小流量长在线业务的所有消息突发间隔大于 10 s 的概率超过 90%,那么当休眠定时器调整为 3 s 时产生的连接数比休眠定时器调整为 10 s 时最多会多出 10%,但用户平均话务量却下降到原来的一半以上。同时,无线网络的传输效率将得到成倍的提升,这对于校园这种 QQ 应用密集的区域是相当有吸引力的。通过在分组域部署的内置或外置 DPI 对小流量长在线消息报文的时间间隔分布情况进行统计分析,可以为优化调整休眠定时器提供参考依据。

因此,调整终端和网络的休眠定时器作为小流量长在线应用优化的重要手段,可有效减少用户对空口资源的占用,降低每用户话务量,减少反向干扰,提升网络性能,从而能够接入更多用户。调整休眠定时器可以普遍适用于如高校区域这种大量用户使用小流量长在线业务的场景

之中<sup>[8-12]</sup>。

### 3.2 调整手机客户端及应用服务器的消息发送方式

大多数手机 IM 客户端为了保持业务的长时间在线,都会周期性地向应用服务器发送心跳消息,以维持点对点(PPP)连接永不中断。每次心跳消息的发送都可能引起空口连接的激活与释放,心跳消息的发送周期越短,增加的连接次数越多,每用户的平均话务量水平和信令开销也会相应增加。因此,在不中断 PPP 连接的条件下,最大限度地降低终端发送心跳消息的频度,可以有效减少空口连接的次数,提高无线资源利用率。如早期版本的 QQ 客户端心跳周期为 30 s,一个小时会产生 120 次的心跳消息,最坏情况下因心跳消息可能会多产生 120 次的空口连接。由于现网中分组域 PDSN 与终端的 PPP 连接的空闲超时定时器通常设置为 10 ~ 15 min。实际上,IM 客户端的心跳周期只要小于 PPP 连接的空闲超时定时器时间就可以维持 PPP 连接不会中断。

另一方面,IM 应用服务器会主动向 IM 客户端频繁推送大量消息,如在 QQ 或 MSN 应用中,服务器会实时更新好友的上/下线通知及各种广告信息等内容,特别是“群”服务中一个用户发送的消息将会广播到“群”中的所有用户,IM 客户端建立的“群”越多<sup>[13]</sup>,接收到的广播消息量就越大。大量来自服务器的消息一方面加重了 DO 网络寻呼终端的寻呼量,同时也因大幅增加的空口连接次数造成对无线资源的过度占用。现场测试中发现一个列有 100 个好友的 QQ 客户端差不多每 30 s 间隔发生一次寻呼及空口连接的激活/释放过程。如果 SP 能调整 IM 应用服务器的消息推送方式,把除聊天这类实时性要求较高消息外的其他消息先缓存起来,再以较长的时间周期批量推送给 IM 客户端,可以大大减少服务器

推送消息的频次,相应减少信令量及对空口资源的占用。

### 3.3 用户接入控制

从上述数学模型的仿真可知,减少每载扇下接入用户数可以显著降低该载扇下的并发连接数,也即意味着可大幅降低 ROT 指标,减少反向干扰,提升网络反向容量,改善用户的业务感知。通过在核心网分组域对载扇下的接入用户(PPP 连接数)进行限制,并根据价值最大化的接入控制策略对长时间在线的小流量长在线老用户实施剔除,接入新用户,以增加用户公平使用网络的机会。用户接入控制方案可应用于发生重大活动、突发事件等引起特定载扇下接入用户暴增的场景,也可用于校园等 IM 应用密集的区域<sup>[14]</sup>。

通过在核心网分组域的 AAA 服务器或策略服务器(PCRF)为每载扇设定可接入的最大用户数门限,并对各载扇下用户的在线时长、总上/行流量及连接次数进行统计<sup>[15]</sup>。当某载扇下用户数(PPP 连接数)达到门限时,AAA 服务器或 PCRF 根据接入控制策略拒绝新用户接入,或通过断开 PPP 连接的方式强制低价值老用户下线,以接入新用户。

## 4 结束语

移动互联网的迅猛发展以及物联网的兴起催生出越来越多的小流量长在线业务,对 EV-DO 网络的影响日益显现。文章在对小流量长在线业务特征进行分析和现场试验的基础上,梳理了 DO 网络承载小流量长在线业务的实现机制,并提出了一种业务接入控制的数学模型。通过仿真,得出了 DO 网络承载小流量长在线业务的网络性能优化方法,最后从终端、网络、业务平台各个环节提出专为小流量长在线业务而优化的解决方案。

#### 参考文献

[1] CDMA 2000 High Rate Packet Data Air

Interface Specification[S]. 3GPP2, 2006.

[2] 1xEV-DO Forward Link Capacity Test Report [R]. QUALCOMM Technical Document, 80-H0581-1 Revision A, 2002.

[3] Interoperability Specification (IOS) for cdma2000 Access Network Interfaces—Part 7 (A10 and A11 Interfaces)[S]. 3GPP2, C.S0024-A, V 2.0, 2009.

[4] CDMA2000 Wireless IP Network Standard: Accounting Services and 3GPP2 Radius VSAs [S]. 3GPP2, C.S0024-A, V 2.0, 2008.

[5] 何晓明, 贾曼, 刘志华. 小流量长在线业务对网络的影响及优化[J]. 电信科学, 2013, 29(2): 142-146.

[6] 田锋. 论“信令风暴”与其解决方案[J]. 现代电信科学, 2011, 43(11): 29-33.

[7] 张志华. 优化典型 EVDO 行业应用[N]. 通信产业报, 2011(3).

[8] 闵锐. EV-DO 网络高效应对 3G 信令风暴[J]. 电信技术, 2012, 20(2): 40-42.

[9] 中兴通讯股份有限公司.ZXC10 BSSB 产品技术说明书[Z]. 2008.

[10] 李良斌, 罗旭耀. 基于无线网络性能数据的用户业务行为分类与感知评估技术[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(5): 56-60.

[11] 杨波. 智能手机信令风暴探析[J]. 数字通信, 2012, 38(4): 81-83.

[12] 赵艳梅, 朱晓燕. 转变运维模式迎接移动互联网新挑战[J]. 电信科学, 2011, 27(10A): 90-93.

[13] 中国电信股份有限公司. 关于小流量长在线业务的 CDMA 无线网承载策略研究[R]. 2012.

[14] 江苏电信股份有限公司. 小流量常在线业务优化指导手册[Z]. 2012.

[15] 谢国瑞. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

#### 作者简介



何晓明, 华南理工大学博士毕业; 中国电信股份有限公司广东研究院高级工程师; 现从事 IP 网络研究及支撑工作, 主要研究方向为下一代互联网、移动互联网、网络性能等; 已发表论文 30 余篇, 申请国家专利 20 余项。



曹维华, 华南理工大学硕士毕业; 中国电信股份有限公司广东研究院高级工程师; 现从事通信研发支撑工作, 主要研究方向为 IP 网络、移动互联网、运营支撑系统等; 已发表论文十余篇。



贺晓东, 华南理工大学毕业; 中国电信股份有限公司广东研究院高级工程师; 现从事数据网络支撑工作, 主要研究方向为移动互联网、宽带接入网、IP 城域网等。

# 软件定义数据中心网络研究

## Software-Defined Data Center Networks

杨旭/YANG Xu, 周烨/ZHOU Ye, 李勇/LI Yong

(清华大学微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

(State Key Laboratory of Microwave and Digital Communication, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0050-05

**摘要:** 提出了一种基于软件定义网络的数据中心网络方案, 并对其结构和部署进行了详细介绍。通过使用软件定义网络技术, 该方案解决了传统数据中心中网络利用效率低下、管控方式复杂、建设运维成本较高等问题。该方案具有结构简单、易于部署的优点。在负载均衡、域内虚拟机迁移等典型应用中, 我们对该方案进行了验证, 结果表明该方案具有良好的实用性。该方案为数据中心网络架构设计提供了一种重要思路。

**关键词:** 软件定义网络; 数据中心; 网络结构

**Abstract:** This paper proposes a data center network deployment scheme based on software-defined networking. By using SDN, this scheme solves the problems such as low efficiency, complex management, and high operation cost in traditional data centers. This scheme has a simple architecture and can be easily deployed. After tested with some typical applications, such as load balancing and intra data center virtual machine migration, the availability of this scheme is presented. This scheme provides a valuable reference for data center network architecture.

**Key words:** software-defined network; data center; network architecture

近年来, 数据中心受到学术界和产业界的广泛关注, 并成为网络研究领域的一个重点内容。数据中心由一个或多个计算机集群及配套的通信、存储、管理、安全设备、软件等组成。建立数据中心, 可以将计算、存储等资源集中起来, 通过统一规划从而减少相应的建设、管理和运营费用; 另一方面能够为用户提供更强的服务能力并使其获得与接入软

硬件环境无关的统一体验。然而, 现有的数据中心网络存在着建设管理复杂、控制不灵活等问题, 影响了其进一步的发展。

软件定义网络<sup>[1]</sup>(SDN)是近年来在网络领域备受重视的一个新热点, 它提出将网络控制功能从转发设备上分离出来, 集中抽象后形成控制平面, 对各转发设备进行控制, 从而提升网络控制的灵活性和可编程性<sup>[2]</sup>。在控制方面, 区别于传统IP网络, 它采用中心控制, 这能够大幅简化控制逻辑、提高计算速度, 使得控制层能够更好地对网络进行管理。此外, SDN还能方便实现网络虚拟化等一

些功能。

利用SDN技术来搭建数据中心网络, 可以简化其网络管理、优化网络性能, 进一步提高数据中心的业务承载能力, 因而受到了业界和学术界的广泛重视<sup>[3]</sup>。例如, IBM和NEC提出了基于SDN的数据中心模型<sup>[4]</sup>, Yahoo<sup>[5]</sup>、Google<sup>[6]</sup>和Microsoft<sup>[7]</sup>等公司使用SDN技术搭建数据中心并实现互联, 中国电信和腾讯等互联网企业也开始试验将SDN技术运用于数据中心环境。

然而, 由于SDN还处于研究和发展的起步阶段, 基于软件定义的数据中心网络尚未有成熟的解决方案, 仍有一些问题尚待研究, 例如, 如何对数据中心实现扩展性良好的有效控制, 数据中心之间如何互联, 数据中心与用户间的流量怎样进行优化等。文章中作者提出了一个基于软件定义的数据中心网络方案, 具有结构简单、易于部署的特点。在原型系统实现上, 使用了自主研发的OpenFlow设备并部署了管理及测量系统, 提供了良好的可编程特性和对资源的管理、监控能力。目前该数据中心已经实现了负载均衡、虚拟机域内迁移等功能, 并对进一步研究数据中心域间互联等关键问题提供了基础环境。

## 1 数据中心网络

数据中心中的一个关键问题是如何有效分配和调度物理资源。在数据中心中, 物理资源主要包括计算资源、存储资源和网络资源等。其中, 计算和存储资源的管理技术相对来说已经比较成熟: 在计算资源方面, 有vSphere<sup>[8]</sup>、HyperV<sup>[9]</sup>等虚拟机管理软件, 通过虚拟化灵活管控服务器的CPU、内存、硬盘等资源; 在存储资源方面, 有网络附加存储(NAS)、存储区域网络(SAN)等方案, 提供管理、备份等功能。但在网络资源方面, 数据中心中现有的管理技术存在着诸

收稿日期: 2014-07-14

网络出版时间: 2014-08-22

项目基金: 国家重点基础研究发展(“973”)项目(2013CB329105), 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA013501、2013AA013505)



如管控复杂、控制不灵活等问题,制约了数据中心的发展和高效利用<sup>[10]</sup>。

### 1.1 网络利用效率低下

现有数据中心网络的管理不够智能,无法根据实时情况对资源进行调配,实现最优利用。另一方面,现行数据中心中,计算资源和网络资源的管理没有得到有效融合,这使得一些依赖网络的应用无法得到高效实现,比如数据中心中常见的虚拟机迁移,其实现并没有充分考虑网络状态,效率较低。

### 1.2 网络管控方式复杂

搭建数据中心的一个优势是通过资源的集中化来简化建设管理工作,从而降低成本。目前,计算和存储资源都有集中式的管理工具来提供统一的资源调配和自动优化配置,但对于网络资源,这种集中式的管理工具仍比较缺乏。

当前的网络管理控制功能分布在各个网络转发设备上,并没有统一的配置接口,管理员要分别设置各个转发设备才能使网络正常工作。另外,目前的配置方式以命令行为主,管理人员需要通过转发设备提供的配置命令设置转发协议、端口配置、接入策略等,这种方式耗时较长且工作量较大。还有,不同厂商的设备在管理接口和功能实现上存在差异,若使用不同的设备进行组网,需要管理人员熟悉多种设备的配置命令及性能指标,进一步增加了管理人员的工作难度。

### 1.3 建设和运维成本较高

不同厂商的转发设备都有各自独特的结构和管理接口,为了应用某些产品特色或者简化管理,建设数据中心时,往往倾向于使用同一厂商的设备。这在一定程度上限制了设备的选择范围,提高了数据中心的建设成本。

除了转发设备外,数据中心还需

要购买流量镜像等监测设备,防火墙等安全设备等。多种设备的应用使得数据中心网络环境极为复杂,同时不同设备的管理接口又不尽相同,这就进一步增加了管理难度,提高运维成本。

## 2 基于SDN的数据中心

SDN是近年来网络领域的新兴技术,具有如下几个特点<sup>[11]</sup>:

- 将转发设备中的网络控制功能分离出来组成抽象的控制平面,并通过集中式控制器对各转发设备进行统一控制。

- 通过软件定义的方式实现控制器,并实现网络控制可编程,允许灵活地制订控制策略。

- 对网络转发功能进行抽象,为不同的转发设备提供统一的转发控制接口,提高设备通用性。

采用SDN技术搭建数据中心网络,能够较好地解决目前存在的问题。

### 2.1 提高网络利用效率

SDN采用集中式控制,相比分布式控制,能更好地把握网络状态,更快速地进行调整,从而实现更加智能、更加高效的管理模式,对网络进行优化。

通过软件定义的控制器,管理人员能够实现自动化的流量均衡<sup>[12]</sup>、安全控制<sup>[13]</sup>等功能,并能方便地进行策略的调整。另一方面,通过融合良好的网络监控机制,控制器可以实现实时的网络优化,并且还可以大幅提高网络利用效率。

最后,集中式、程序化的控制器能够方便地与数据中心的计算、存储资源管理系统进行融合,在虚拟机迁移等场景下优化网络性能,提高处理能力,从而提升整个数据中心的运行效率。

### 2.2 简化网络管理控制

SDN实现了控制平面和数据平面的分离,将网络管控功能迁移到了

控制器上,为网络管理提供了一个集中式的接口,使得对网络进行统一管理和控制成为了可能。在SDN环境下,管理人员仅通过对控制器进行调整即可实现对全网转发设备的配置,大幅简化了配置流程,也降低了策略部署响应时间。

另一方面,通过使用软件定义的控制器,管理人员避免了大量的命令行操作。控制器利用通用语言编写,使得管理人员可以快速上手,同时它屏蔽了不同厂商的管理接口,使得管理复杂度得以降低。

### 2.3 降低建设和运维成本

SDN将控制功能从转发设备中剥离,简化了转发设备的功能,从而实现通用性更强的转发设备。这一方面使得建设数据中心时能更灵活地选择设备。另一方面,通过减少转发设备的生产成本,使得数据中心建设成本得到降低。

控制器的强大计算能力和可编程能力使得部分传统的监测、安全设备功能能够以软件的形式实现,从而简化管理并减少额外的设备支出。

可以看出,SDN技术在数据中心网络资源管理方面有着很好的应用前景,能进一步节省其建设和运维成本,推动数据中心的发展。

## 3 软件定义数据中心网络方案

为了研究和验证SDN技术在数据中心网络建设和管理方面的作用,我们设计了一种基于软件定义的数据中心网络方案并加以实现。在进行数据中心网络设计时,需要考虑设备组网、逻辑结构等方面。下面将逐一进行介绍。

设备组网如图1所示。我们设计了一个多站点的数据中心组网方案,整体方案分为两层:一层为数据中心站点,一层为全局管理系统。

在各数据中心站点内部,包含物理交换机、虚拟交换机、网关及本地



▼表 1 设备列表

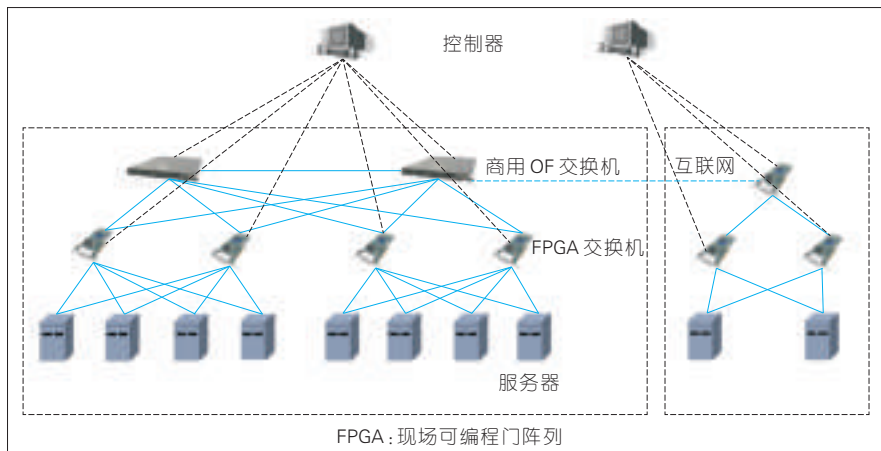
设备名称	功能描述	数量
机架服务器 HP DL388p Gen8	E5-2620 8 GB RAM 300GB 6G SAS 4x1Gbit/s	8
PC	Intel i7 960 8 GB RAM 4x1 Gbit/s	8
Pronto 3297 OpenFlow Switch	OF 1.0 48x1 Gbit/s 4x10 Gbit/s SFP	2
Tunie-FPGA	OF 1.0 8x1 Gbit/s ARM	7
FPGA: 现场可编程门阵列		

大量设备并且处理更多数据,因此需要使用商用 OpenFlow 交换机。现有的商用 OpenFlow 交换机大多具有几十个网络接口,提供 1 G/10 G 的网络带宽,具备较强的逻辑运算能力,能够满足大数据量的处理需求。

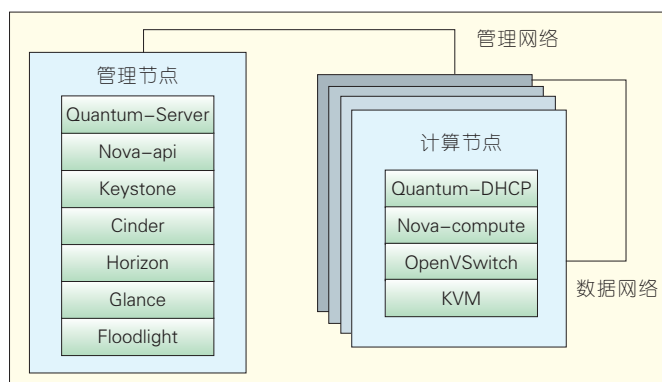
在网络拓扑方面,如图 3 所示,我们搭建了两个数据中心站点,每个站点都使用二层 clos 网络拓扑。其中站点 1 使用 PC 机作为服务器,商用 OpenFlow 交换机作为上层转发设备, TUNIE FPGA 作为底层转发设备;站点 2 使用机架服务器,转发设备都使用 TUNIE FPGA。站点之间通过校园网相连。

在计算资源控制系统方面,我们采用开源的 OpenStack 系统<sup>[14]</sup>,其结构如图 4 所示:一台服务器作为管理节点,部署 OpenStack 的若干管理组件,包括管理虚拟机状态的 Nova,管理虚拟机镜像的 Glance,管理虚拟机网络的 Quantum,管理块存储的 Cinder,以及提供网页管理界面的 Horizon 等。其他服务器作为计算节点,部署虚拟机运行相关组件,包括 Nova、Quantum 及 KVM、OpenVSwitch 等。管理节点与计算节点通过管理网络连接,计算节点间通过数据网络连接。

网络资源控制系统方面,核心是 OpenFlow 控制器。在管理节点上,运行了开源的 Floodlight 控制器<sup>[15]</sup>,它通过控制网络与各转发设备相连,获取网络状态,并对转发策略进行配置。



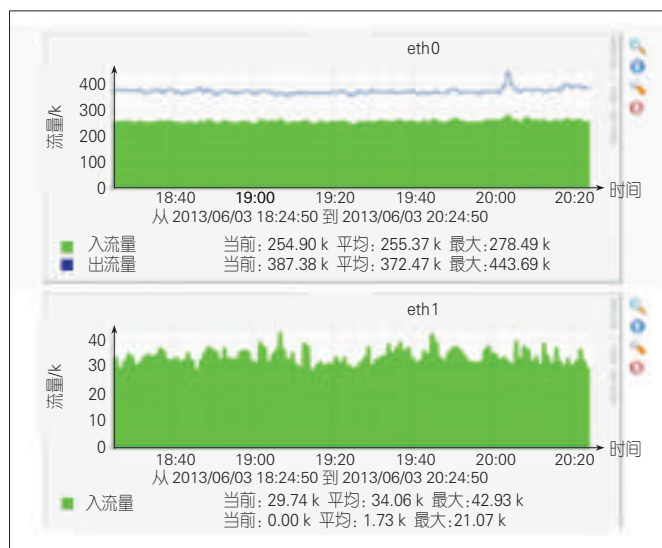
▲图 3 原型系统拓扑

图 4  
OpenStack 系统结构

另外,它以 REST API 的方式与计算资源管理系统进行通信,将网络管理与计算管理融合到一起<sup>[16]</sup>。

为了能够实时获取整个数据中心的运行状态,我们还部署了一套监测系统,主要包括 3 个部分,分别用

于监测物理机(如图 5 所示)、虚拟机和网络转发设备的状态。物理机状态通过各台服务器上安装的简单网络管理协议(SNMP)协议来收集,虚拟机状态由 OpenStack 调用 HyperVisor 来进行收集和维持,网络转发设备状

图 5  
物理机监测系统界面



态则主要由 Floodlight 控制器通过 OpenFlow 协议来进行获取<sup>[17]</sup>。这些监测指标能够通过访问网页来进行实时获取。

## 5 原型系统验证

为了验证原型系统的性能,我们部署了一些 demo 并进行了测试。

负载均衡是一种常见的流量工程,在传统 IP 网络中实施较为复杂,而在 SDN 中,通过中心控制器可以较为容易地监控并部署负载均衡机制,同时其优化效果也更好。在原型系统中,我们部署了初步的负载均衡算法,现有的控制端算法包括随机均衡、轮询均衡和流量比例均衡 3 种。其实际效果已通过现场可编程门阵列 (FPGA) 进行测试,能够达到较好效果<sup>[18]</sup>。

虚拟机迁移是数据中心中的基础功能。和传统数据中心中迁移过程只涉及计算资源管理不同,在该原型系统中,迁移过程融合了网络资源的管理,在迁移前后,控制器要对数据中心网络进行操作,优化链路状态并保障迁移过程中虚拟机的通信不中断。这增强了迁移过程中网络的可控性,提高了网络的利用效率。

## 6 结束语

近年来,数据中心受到了越来越广泛的关注。但现有的网络方案仍存在着一些问题,如管控复杂、成本较高等。SDN 是最近兴起的网络技术,它通过将网络管控功能与转发功能分离并采用集中控制的思路,能够有效地解决现有数据中心网络遇到的困难。因此,基于软件定义的数据中心方案有着良好的前景。

文章中设计了基于 SDN 的数据中心网络方案,并进行了原型系统的实现。该方案具有复杂度低、管控能力强、操作简便、成本较低等特色。目前,该原型系统已经在部署当中,并实现了若干演示应用,如数据中心状态监测、负载均衡、域内虚拟机迁

移等,后续的研究方案包括跨域虚拟机迁移、域间流量均衡演示等。

### 参考文献

- [1] McKeown Keynote talk: software-defined networking [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. Apr 18–25, 2009, Rio de Janeiro, Brazil. Brazil: IEEE Press, 2009: 1–1.
- [2] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69–74.
- [3] SDN 概念升温,市场角力加剧[EB/OL]. [2013–4–10]. [http://www.cnii.com.cn/wlkb/rmydb/content/2013-01/31/content\\_1088793.htm](http://www.cnii.com.cn/wlkb/rmydb/content/2013-01/31/content_1088793.htm)
- [4] IBM and NEC Bring SDN/OpenFlow to Enterprise Data Center Networks [EB/OL]. [2012–01]. <http://public.dhe.ibm.com/common/ssi/ecm/en/qcl12364usen/QCL12364USEN.PDF>
- [5] Warehouse Scale Datacenters: The case for a New Approach to Networking [EB/OL]. [2011–10–18] <http://www.opennetsummit.org/archives/oct11/gahinsky-tue.pdf>
- [6] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on SIGCOMM. Aug 13, 2013, Hong Kong, China. 2013: 3–14.
- [7] HONG C Y, KANDULA S, MAHAJAN R, et al. Achieving high utilization with software-driven wan[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM. Aug 13, 2013, Hong Kong, China. 2013: 15–26.
- [8] VMware vSphere [EB/OL]. <http://www.vmware.com/cn/products/vsphere>
- [9] Hyper-V 概述 [EB/OL]. <http://technet.microsoft.com/zh-cn/library/hh831531.aspx>
- [10] GREENBER A, HAMILTON J, MALTZ D A, et al. The cost of a cloud: research problems in data center networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 39 (1): 68–73.
- [11] JAIN R, PAUL S. Network virtualization and software defined networking for cloud computing: a survey [J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51 (11): 24–31.
- [12] KOERNER M, KAO O. Multiple service load-balancing with OpenFlow[C]// 2012 IEEE 13th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Jun 24–27, 2012. 2012: 210–214.
- [13] SHIN S, PORRAS P, YEGNESWARAN V, et al. Fresco: Modular composable security services for software-defined networks[J]. Internet Society NDSS, 2013.
- [14] OpenStack [EB/OL]. <http://www.openstack.org/>
- [15] Floodlight Open SDN Controller [EB/OL]. <http://www.projectfloodlight.org/floodlight/>
- [16] 庞冉, 黄永亮. SDN 技术在综合承载传送网中的应用分析[J]. 邮电设计技术, 2013, (11): 11–24.
- [17] 刘媛妮, 唐红, 赵国锋. 未来互联网体系结构研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(1): 52–58.
- [18] 蒋培成, 陈鸣, 李兵. OpenFlow 软交换机的性能测量[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(1): 24–29.

### 作者简介



杨旭,清华大学硕士研究生,主要研究方向为软件定义网络及相关应用。



周辉,清华大学博士研究生,主要研究方向为网络虚拟化、下一代网络、SDN 等。



李勇,清华大学电子工程系博士毕业;现任清华大学助理教授;主要研究领域为下一代网络、移动容迟网和软件定义网络。

## 综合信息

### 中国光纤接入端口达 1.35 亿个

2014 年 9 月 11 日消息,在日前召开的“2014 光通信技术和发展论坛”上,武汉邮电科学院原副院长兼总工程师毛谦透露,截至 2013 年年底,全球 FTTH 用户达到 1.28 亿,中国就有 4 082 万户。

截至 2014 年 7 月底,中国光纤接入 FTTH/O 端口达到了 1.35 亿个,光纤接入 FTTH/O 用户总数达到 5 516.3 万户。(转载自《中国信息产业网》)

# 一种实现 CSFB 的方法研究

## A Method for Implementing CSFB Solution

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0055-03

**摘要:** 探讨了一种电路域回落(CSFB)的实现方法,该方法可以避免对现网已经部署的访问移动交换中心服务器(VMSC)、网关移动交换中心(GMSC)升级改造,易于在现网部署。在本 CSFB 解决方案中,由归属用户服务器(HSS)执行呼叫重试功能,从组网来看,只需要增加一个 Proxy 移动交换中心(MSC)服务器,对现网已经部署的 VMSC、GMSC 没有改造要求。

**关键词:** CSFB; 移动终呼漫游重试(MTRR); HSS; Proxy MSC

**Abstract:** This paper describes an optimized circuit-switched fallback (CSFB) solution that avoids the need to update a live visit mobile switch center (VMSC) server and gateway mobile switch center (GMSC) server. The optimized CSFB solution is easy to deploy. A proxy mobile switch center server is added in the network, and home subscriber server (HSS) perform mobile terminate call retry, which does not require any update of the MVSC or GMSC.

**Key words:** CSFB; mobile terminating roaming retry (MTRR); HSS; Proxy MSC

朱玉娜/ZHU Yuna

(中兴通讯股份有限公司,江苏 南京

210012)

(ZTE Corporation, Nanjing 210012, China)

电路域回落(CSFB)是一种允许在演进分组核心网(EPC)中的终端设备(UE)通过回落到电路域业务(CS)域,并借用CS域的基础设施来提供语音服务的技术。EPC网络本身也提供了通过IP多媒体子系统(IMS)网络来给UE提供语音服务的手段,此时UE是作为IMS的会话初始协议(SIP)终端通过EPC网络直接注册到IMS网络中,进而由IMS网络为其提供语音服务。但在EPC网络建设和部署的初期,与EPC网络相连的IMS网络可能并没有发展得很成熟,无论覆盖范围和业务能力都无法与成熟的CS网络相媲美<sup>[1-4]</sup>。

CSFB技术中,在LTE和2G/3G的重叠覆盖区域,UE回落到CS域后发起语音、非结构化补充数据业务

(USSD)和其他补充业务。终端通过LTE网络发起LTE和CS的联合跟踪区(TA)/位置区(LA)更新,并由EPC网络的核心网侧设备触发从LTE接入的终端回退到从GSM/TD-SCDMA接入并进行CS业务。

由于支持CSFB技术的移动管理实体(MME)在SGs口发起注册的过程中所使用的位置区标识(LAI)是MME根据TA推导出来的,这个推导的过程可能是不准确的<sup>[5]</sup>。因此通过CSFB的终呼可能会由于实际的LAI和推导出来的LAI不一致,从而导致呼叫失败。为解决该问题,3GPP提出移动终端漫游重试(MTRR)方案。

MTRR是一种在寻呼或路由查询期间,由于用户移动到其他移动交换中心(MSC)/拜访位置寄存器(VLR)覆盖的范围内,为了避免终呼失败,而再次发起一次路由查询的技术<sup>[6]</sup>。

3GPP协议提出的MTRR解决方案,是一种全网升级的方案。该方案对现网已经部署的访问移动交换中心服务器(VMSC)有升级要求,要求现网已经部署的所有与LTE无线网络有重叠覆盖的VMSC进行升级改造,改造后的VMSC支持MME和MSCS之间的SGs接口。

文章旨在提出一种对现网已部署的网关移动交换中心(GMSC)没有改造要求的CSFB解决方案,在本CSFB解决方案中,由归属用户服务器(HSS)执行呼叫重试功能。

### 1 增强CSFB解决方案组网

文中研究的CSFB的组网结构如图1所示。

如图1所示,全网新建了一套Proxy MSC,用以负责LTE用户的回落处理。用户登记到LTE网络时统一从Proxy MSC进行联合位置更新,HSS在用户漫游切换中进行呼叫重试。

CSFB的Proxy方案优势在于该方案只需要在现网和LTE网络之间架一个桥梁,而Proxy本身并不需要实现现网的业务。这种组网方案由于Proxy MSC和无线网络控制器(RNC)没有连接,因此Proxy MSC不具备直接处理呼叫的能力。对于移动起呼CSFB(MO CSFB),UE可以直接回落

收稿日期: 2014-05-20  
网络出版时间: 2014-07-08

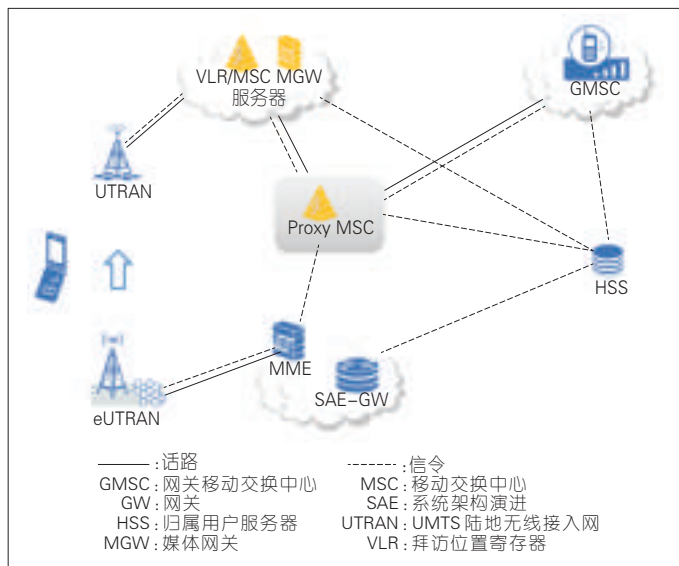


图1  
CSFB的组网

到CS域,这种场景不需要借助Proxy MSC就可以完成呼叫起呼;对于移动终呼CSFB(MT CSFB),由于LTE用户此时是通过Proxy MSC在HLR上注册,因此GMSC可以把这一部分呼叫路由到Proxy MSC,由Proxy MSC向HSS发起终呼路由查询请求,由HSS执行呼叫重试,把呼叫继续路由到用户真正所在的MSC进行呼叫处理<sup>[7-9]</sup>。

HSS负责终端用户的业务数据存贮等。在本CSFB解决方案中,由HSS执行呼叫重试功能。

VLR/MSC服务器/MGW为用户当前实际漫游到的MSC服务器/VLR。MME负责EPC业务控制面的处理,进行会话管理和移动性管理。SAE-GW负责EPC业务用户面的处理,提供分组路由和转发功能、承载控制、计费、地址分配等功能。陆地无线接入网(UTRAN)为3G无线接入网,eUTRAN为LTE无线接入网。LTE网络用户回落时,都先回落到PROXY MSC上。

## 2 增强CSFB解决方案业务流程

### 2.1 注册流程

引入Proxy MSC/VLR后,UE的注册流程如图2所示。

注册消息通过MME和Proxy MSC/VLR之间的SGs口进行注册,本网所有的CSFB用户在LTE网络中都注册到Proxy MSC/VLR中<sup>[10]</sup>。具体注册的流程如下,该流程和图2中的7个步骤相对应:

(1) UE首先发送注册请求消息给MME;

(2) MME根据跟踪区标识(TAI)推导出LAI,由于Proxy MSC代理完成了所有的EPS/国际移动用户识别码(IMSI)联合位置更新,因此MME推导出的LAI就是Proxy MSC/VLR里面的虚LAI。MME通过SGs发送位置更新请求消息给Proxy MSC/VLR进行附着,位置更新请求消息携带虚LAI;

(3) Proxy MSC/VLR发送位置更新请求消息给HSS,HSS更新其保存的用户位置信息,即将HSS中保存的VLR号码更改为Proxy MSC/VLR号码;

(4) HSS向Proxy MSC/VLR插入用户的业务签约数据;

(5) HSS向Proxy MSC/VLR返回位置更新响应消息;

(6) Proxy MSC/VLR

在完成CS域的位置更新以后,返回位置更新完成消息给MME;

(7) MME向UE返回注册完成消息,UE在Proxy MSC/VLR注册完成。

### 2.2 终呼流程

文章中研究的CSFB业务终呼流程如图3所示。

注册流程完成以后,HSS中保存的用户位置信息就是Proxy MSC/VLR号码<sup>[11]</sup>。终呼流程中,HSS就向Proxy MSC/VLR号码获取用户的漫游号码。

如图3所示,终呼业务流程说明如下:

(1) 如图3中步骤1、2所示,GMSC收到呼叫请求消息,即收到初始地址消息后,向HSS发送路由请求消息;

(2) 如图3中步骤3所示,HSS向Proxy MSC发送提供漫游号码请求消息(PRN),在消息中携带指示回落的参数;

(3) 如图3中步骤4所示,Proxy MSC通过寻呼消息通知终端回落到传统电路域;

(4) 如图3中步骤5、6所示:终端根据寻呼指示,向当前实际注册到的VMSC发起位置更新;

(5) 如图3中步骤7、10、11、12所示,HSS收到来自当前终端实际漫游到的VMSC的位置更新请求消息后,就向Proxy MSC发送删除位置消息。

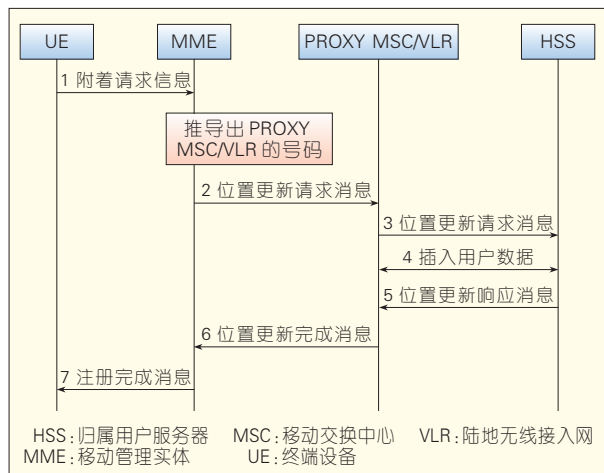
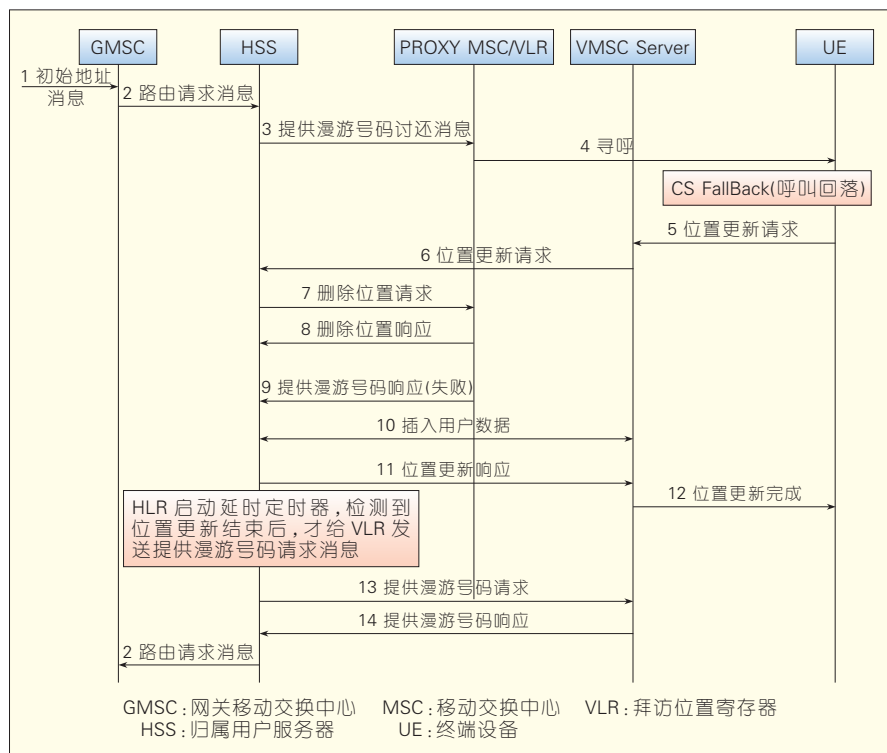


图2 CSFB Proxy MSC注册流程





▲ 图3 业务终呼流程

同时HSS向VMSC插入用户数据和返回位置更新响应消息。UE位置更新完成,UE注册到实际漫游到的MSC服务器/VLR中;

(6)如图3中步骤8、9所示,Proxy MSC收到删除位置消息后,向归属位置寄存器(HLR)返回失败的提供漫游号码响应消息;

(7)如图3中步骤13所示,HSS收到Proxy MSC返回的失败响应消息后,启动一个检测定时器,检测由当前终端实际注册的VMSC服务器发起的位置更新流程是否结束,若结束,则向VMSC Server重新发起提供漫游号码PRN,请求漫游号码;

(8)如图3中步骤14、15所示,HSS收到VMSC服务器返回的漫游号码后,将其返回给GMSC;

(9)GMSC完成后续话路接续。

### 2.3 时延分析

CSFB的MO/MT呼叫流程,需要跨MSC位置更新和在HSS执行呼叫重试,相比普通CS域呼叫,可能会增

加4~5s时延。

### 2.4 对HSS性能影响分析

HSS启用呼叫重试功能后,会造成HSS性能下降。呼叫重试功能对HSS性能的影响取决于多种因素。

第1个影响因素是:完成一个位置更新流程所需要的时间。在HSS执行呼叫重试,HSS会设定一个定时器来检测由当前终端实际注册的VMSC服务器发起的位置更新流程是否结束,定时器超时,若位置更新结束,则HSS发起呼叫重试;定时器超时,若位置更新还未结束,则HSS重新设置定时器继续等待。这个定时器可以设置为100~500ms。若整个网络的质量好,位置更新过程能在很短的时间内(比如500ms内)完成,完成后由HSS执行呼叫重试功能,对HSS的性能影响很小;若网络质量比较差,位置更新过程要在较长的时间内(比如3s内)完成,完成后由HSS执行呼叫重试功能,对HSS的性能影响较大。

其次,使用CSFB业务的用户数的多少,对HSS性能下降的程度也有影响<sup>[12]</sup>。

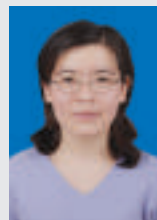
## 3 结束语

文章提出了一种对现网GMSC没有改造要求的CSFB解决方案,在本CSFB解决方案中,只需要通过增加一个Proxy MSC,并由HSS执行呼叫重试功能,就可以使整个CS网络支持CSFB功能。文章提出的CSFB解决方案对现网设备改造小,工程实施成本低,易于在现网部署。

### 参考文献

- [1] 3GPP. 3GPP TS 23.272: Circuit Switched (CS) fallback in Evolved Packet System (EPS) [Z].2012.
- [2] 3GPP. 3GPP TS 23.018: Basic call handling [Z].2012.
- [3] 3GPP. 3GPP TS 23.401: GPRS Enhancements for E-UTRAN Access [Z].2012.
- [4] 3GPP. TS 23.401: GPRS Enhancements for E-UTRAN Access [Z].2012.
- [5] 3GPP. 3GPP TS 23.221: Architectural Requirements[Z].2012.
- [6] 3GPP. 3GPP TS 25.413: UTRAN Iu interface Radio Access Network Application Part (RANAP) signaling[Z].2012.
- [7] 3GPP. 3GPP TS 23.012: Location management procedures[Z].2012.
- [8] 3GPP. 3GPP TS 23.079 Support of Optimal Routing (SOR); Technical realization; Stage 2 [Z].2012.
- [9] 3GPP. 3GPP TS 23.116 Super-charger technical realization; Stage 2[Z].2012.
- [10] 3GPP. 3GPP TS 29.118 Mobility Management Entity (MME) - Visitor Location Register (VLR) SGs interface specification[Z].2012.
- [11] 潘延名,卢艳娥,骆艳卜,李思佳. 稳健的GPS干扰抑制方案研究[J].重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(3): 330-334.
- [12] 孙乐,张丽.E-UTRAN自组织网络(SON)关键技术[J].邮电设计技术, 2012(12): 08-12.

### 作者简介



朱玉娜,东南大学硕士毕业;现为中兴通讯股份有限公司核心网技术专家,长期从事移动核心网的技术研究以及产品规划设计工作,具有十多年的通信产品研发经验,拥有多项专利技术;发表过多篇论文。

# 无线体域网

2

陈文/CHEN Wen

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

[编者按]无线体域网是个人健康信息采集与传输的重要手段之一,具有重要现实意义和产业化前景,受到工业界、学术界和标准化组织的广泛关注。另外,IEEE 802.15.6 协议标准是目前国际上公认的一款适用于健康信息采集的未来超短距无线体域网协议标准。讲座将分3期对该技术进行介绍:第1期讲述无线体域网的背景、研究动态和技术特征;第2期对无线体域网的频段选取、信道建模、MAC层协议、通信技术和数据处理技术特征进行介绍;第3期介绍无线体域网的节点设计、数据采集和应用场景问题。

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 05-0058-04

## 4 无线体域网的频段选择

根据目前的研究分析,无线个人通信系统可以操作于一些无需牌照的频谱上,并得到全球普遍的认可。人体域网络的重要频带包括可植入通信系统(MICS)频带、无线医疗遥测服务(WMTS)频带、工业-科学-医疗(ISM)频带以及超宽带(UWB)频带。由图2可知道,目前各个国家和地区选用的适用于无线体域网(WBAN)的频带<sup>[6]</sup>。

### (1) MICS

MICS可以提供超低功率、无需牌照的移动无线服务,这样医疗护理提供者就能在一个植入设备与一个基站之间建立高速、短程无线连接,支持结合植入医疗设备的诊断和治疗功能。MICS频段为402~405 MHz。MICS频带已经被大部分国家和地区广泛接受。

### (2) WMTS

WMTS一般用于通过无线电技术

来远程监控病人的健康。WMTS的使用给予了病人很大的移动性,减少了医疗监护的费用。目前,WMTS主要是在美国、日本、澳大利亚等国家和地区中使用,主要频带分散在420~429 MHz、440~449 MHz、608~614 MHz、1 395~1 400 MHz、1 427~1 429.5 MHz等。这些频带非常适合WBAN,首先,它属于低频带,可提供大量通信带宽,如在608~614 MHz中允许有4个1.5 MHz带宽的信道;其次,WMTS带宽只用于医疗通信,这样就比ISM频带的干扰要少很多。

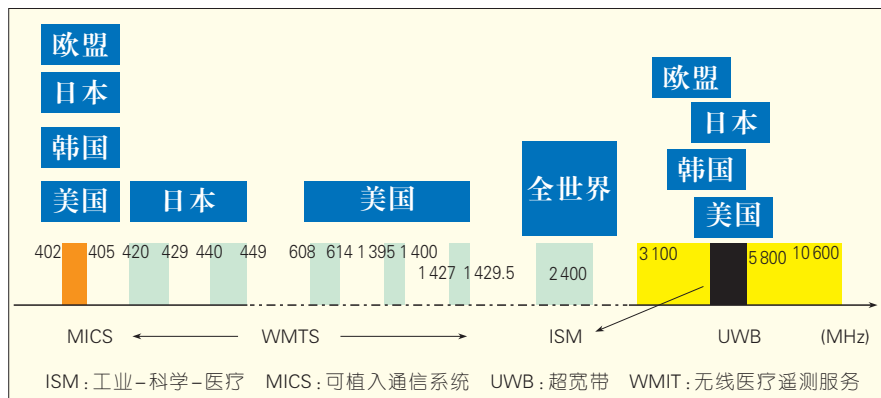
### (3) UWB

UWB是一种短距离的无线通信

方式,其传输距离通常在10 m以内,并使用1 GHz以上带宽,通信速度可以达到每秒几百兆比特以上。UWB不采用载波,而是利用纳秒至微微秒级的非正弦波窄脉冲传输数据。因此,UWB所占的频谱范围很宽,适用于高速、近距离的无线个人通信。美国联邦通信委员会(FCC)规定,UWB的工作频段范围从3.1~10.6 GHz,最小工作频宽为500 MHz。

### (4) ISM

ISM频带是国际电信联盟无线电通信组(ITU-R)定义的无线电规范,ISM的分配无需牌照,因而可以为WBAN所方便使用。ITU-R为ISM定



▲图2 WBAN的频带

收稿日期: 2014-05-10

网络出版时间: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金中法合作项目(61161130529)

义的频带范围很大:

- 6.765 ~ 6.795 MHz (中心频率 6.780 MHz)
- 13.553 ~ 13.567 MHz (中心频率 13.560 MHz)
- 26.957 ~ 27.283 MHz (中心频率 27.120 MHz)
- 40.66 ~ 40.70 MHz (中心频率 40.68 MHz)
- 433.05 ~ 34.79 MHz (中心频率 433.92 MHz)
- 902 ~ 928 MHz (中心频率 915 MHz)
- 2.400 ~ 2.500 GHz (中心频率 2.450 GHz)
- 5.725 ~ 5.875 GHz (中心频率 5.800 GHz)
- 24 ~ 24.25 GHz (中心频率 24.125 GHz)
- 61 ~ 61.5 GHz (中心频率 61.25 GHz)
- 122 ~ 123 GHz (中心频率 122.5 GHz)
- 244 ~ 246 GHz (中心频率 245 GHz)

从上面分析我们可以看到,很多现存标准都使用了ISM频带,如IEEE标准中的802.11b/g(WLAN)、802.15.1(Bluetooth)、802.15.4(ZigBee)等都使用了2.4~2.4835 GHz频带,这就带来了在这些频带上的共存性问题。考虑到人体对电磁波的吸收,我们对于体内的通信拟采用低频段,对于体外的通信则拟采用高频段;发信息采用高频段,而接受控制命令,由于体域网通信较少的数据量,我们则采用低频、低速率传输。中心频率随着周围电磁环境不断变化,而实现动态调整。

## 5 无线体域网的信道模型

WBAN通信所依赖的人体无线信道特性,包括体外、体表以及体内无线信道特性,主要由确定论和随机论两类特性因素决定。前者是指人体生物组织局域环境中媒质的电磁特

性因素是确定的,而后者是指人体姿态、动作等特性因素是随机的。同时,由于现有蜂窝移动通信系统的空间信道特性(SCM),主要由其环境中的电磁媒质特性因素决定,该特性因素几乎全是随机的,因此人体信道特性与SCM特性完全不同,二者的建模技术具有本质区别。可见,WBAN必须具有自己的HBCM,才能得以发展。因此,作为支撑WBAN系统设计和开发基础的人体信道特性建模技术,是WBAN技术必须研究的基础性关键技术之一。同目前已有的HBCM建模技术不同,未来急需进一步发展的人体信道模型(HBCM),其建模技术将面临更加苛刻的“高效率、高精度、高通用性”性能和“多频段、多连通”功能的指标约束。该“3高2多”指标约束,已经成为IEEE 802.15.6标准化HBCM必须满足的要求。如果上述要求没有得到较好满足,将会对IEEE WBAN系统的生物安全性、适用性以及低能耗和高效率通信带来巨大的负面影响。为此,需要针对IEEE目前人体信道场景和人体无线通信频段所存在的空白点,开展能满足“3高2多”指标约束的HBCM研究工作。其中,HBCM的场景精细化和多频段化是核心问题,该问题最终可以归结为精细化、多频段WBAN信道特性建模、评估和验证问题。文章中主要解决2个方面的关键问题:

(1)精细化、多频段HBCM新型特性建模和评估问题。

(2)上述特性的验证方法问题。

WBAN无线系统性能设计与开发能严重依赖精细化、多频段HBCM特性,因此,上述2个问题需要同时解决。其中,问题(1)的关键是:如何在“3高2多”特定约束条件下对HBCM特性进行创新开发,并进行建模和性能评估,得到发展和深化IEEE 802.15.6规范指标的HBCM。问题(2)的关键是:如何在上述特定约束条件下得到精细化、多频段HBCM

新特性的验证方法。近年来,随着计算电磁学、三维实体电磁建模技术、电磁仿真手段以及仿真验证方法的不断发展和完善,解决上述问题的技术条件已经基本成熟,表现为:结合电磁场计算、仿真以及天线、馈电网络新的设计理论,HBCM电磁特性研究面临的多尺度电磁计算、多维参量优化设计问题可以得到有效缓解。

## 6 无线体域网的通信技术

在医疗领域采用无线技术的主要挑战是降低能量消耗。医疗保健中所用的传感器大小是受限的,不能嵌入大容量电池。另外,这些传感器更倾向于无需更换它们的电池。理想情况下,它们甚至可以从环境中摄取能源:通过全身运动,从身体之间的温差和环境中获取能量。然而,现有技术的低功率传感器通常被认为是连接到“主要动力”的枢纽站。以Zigbee的情况为例:中心一直处于听的状态,传感器可以在任何时间传送数据,或者当有新数据的时候通知中心。然而,这样的供电站是不现实的,也不是总存在的。对于所有这些技术,无线电设备的组件总是消耗更多的能量。有趣的是,接收消耗的能量通常和传输消耗的能量一样多,所有这些技术都将受益于减少无线设备平均工作时间的算法。此外,在无线传感器网络中使用的技术大多是网络技术。如果我们设法减少在网络层面上的功耗,而不是只在一个“终端设备”节点降低能耗水平,那么协作算法是实现这一目标的关键。在同时考虑到功耗和可靠性后,这种算法将允许选择(或合并)到达节点的最佳路径<sup>[7]</sup>。

在传感器网络中,信息从传感器节点传到信宿节点有很多路径。根据每个节点的限制功率,我们可以设计一种功率/能量高效的传输方式。同时,在网络节点中进行最优功率分配,是在有限功率下达到最大速率的一种有效的办法。在多跳中继信道



中有许多的中继选择方法,例如“调和平均方法”、“最佳最差信道方法”以及“基于信噪比(SNR)的选择方法”。考虑到功率限制,人们需基于网络功率(能量)限制,设计一种有效的多跳中继选择方法,并将在有限功率控制下,进行节点间的最优功率分配,以达到最大速率。同时多跳中继选择方法还与网络编码设计结合,因为每个节点的功率与其网络编码系数选择有关。

虽然近年来业界对于基于 WBAN 的协同通信已经广泛研究了,但是我们还需考虑更高功效的移动设备辅助的协同结构,而不是一般的传感器之间的合作。由于绿色认知技术已经包含在移动设备中了,这增加了灵活性并且可极大的改善一个 WBAN 的性能。绿色协同传输过程可概括为3个阶段<sup>[9]</sup>:

(1) Intra—BAN。移动设备和医疗仪器都作为接收端,它们分别致力于从信源到信宿链路中的分离和收集多径脉冲。

(2) Inter—BAN。在移动设备端将采用解码转发(DF)方案,接入点将采用最大比合并(MRC)或者一种中继选择技术来将多径信号和认知测试信号合并。

(3) Beyond—BAN。在 WAN 电信技术(比如 GPRS、3G、LTE 或 xDSL 等)的支持下,信息能够转发到可能隔得很远的中央控制器中,然后医疗仪器解码信号提供多样化的应用。

## 7 无线体域网的 MAC 层协议

虽然目前 WBAN 的 MAC 层协议还没有具体的标准形成,但是标准化工作小组在最新发布的 IEEE 802.15.6 技术需求文档中,指出新标准将会定义 WBAN 的物理层和 MAC 层,并应用于医疗和非医疗领域。该技术文档还指出对 WBAN 的研究还包含以下几个方面<sup>[9]</sup>:

• 服务质量(QoS)。包括合适的检错、纠错方法,以保证一定的端到

端时延,灵活地适应各种应用需要。

• 能量消耗。指节点以极低的功率工作,以保证长使用寿命。

• 网络拓扑。网络可以支持多跳的通信环境,如树型、mesh 结构,另外网络初始化过程应简单,可以动态地支持节点的加入及退出。

• 数据传输速率。点对点通信时,数据传输速率支持最低 1 kbit/s 的医疗应用,10 kbit/s 的非医疗应用,并支持最高 10 Mbit/s 的非医疗应用;数据收集点需要支持最高 1 Mbit/s 的医疗应用和 10 Mbit/s 的非医疗应用。

• 其他。包括复杂度、移动性、射频电磁波吸收率、安全性、扩展性等特性的研究。

由于无线环境的特殊性,开发 WBAN 有效的路由协议并不是简单的事情。首先,带宽受到限制并被共享,同时还受衰弱、噪声和干扰的影响,会产生变化。其次,形成网络的节点在可用能量和计算功率上可能都不一样。虽然目前在传感器网络上已开始很多研究,但这些协议不能用于人体内部网络,因为这些协议主要设计并用于大型网络,而 WBAN 只涉及到较少数量的传感器设备。此外,在传感器网络中,传感器和接收器之间进行的是单跳通信,WBAN 则需要更高的可靠性。在日前的实现中,这些网络采取了星型拓扑结构,传感器直接与个人设备互连,它们之间只有一条路由,因此这些采用了直接通信的协议并不需要考虑路由方面的问题。目前,专门设计开发一种 WBAN 的新网络协议并不是主要的难题,但考虑到人体周围网络的特殊性要求,建立一种能够保证可靠性、时延等要求,同时又可以降低能量消耗并最大程度符合 WBAN 具体技术要求的协议的难度就增加了不少。

WBAN 模块化架构使用了模块化的设计来替代一般的层的方法,也就是说所有需要的功能都作为软件模块来实现。模块的使用考虑了一种更灵活的解决方案,只要改变相应的

模块,一些功能可以简单地改变、增加或者去除。由于这些模块都在同一层来实现,它们可以实现比一般跨层方法更简便的使用和修改。用模块化的方法开发协议是一种设计网络协议的新方法。在层设计中,驻留在不同层的协议之间的接口都被明确定义,如 TCP/IP 协议栈,在模块化架构中已不再是一个问题。这种模块化的方法确保模块有合理的顺序,模块间交换的参数通过标准化后传递。不同模块之间的交互由控制器模块来处理,控制器模块有责任在恰当的时间执行合适的功能。根据一些 WBAN 针对 MAC 层的关键技术要求,我们可以将这些技术要求模块化到这个架构中来处理。

## 8 无线体域网中数据融合技术

无论是在 WSN 中还是在 WBSN 中,降低能量消耗都是一个重要的研究方向。为了降低能量消耗,我们一般从2个方面入手:传输路径和传输内容。传输路径和传输内容所对应的技术分别为路由协议和数据融合技术。在该讲座中,我们主要研究的是数据融合技术<sup>[10]</sup>。所谓数据融合,就是将多份数据或信息进行多级别、多方面、多层次的处理,即组合出更有效、更符合用户需求的数据的过程。数据融合的目的不仅是为了提高传感器节点处理数据过程中的反应速度,而且还需要通过数据之间的协同操作来减少传输的数据流量,进而提高节点(特别是植入式的节点)以及整个网络的生命周期。例如,在 WBAN 中鉴于单个节点的监测范围以及可靠性有限,在部署网络的时候往往利用多节点进行采集。另外,有时为了提高准确度,采集范围往往存在一定的交叠。由于节点是连续发送数据的,且数据之间具有一定的相关性,即存在冗余信息,因此可通过数据融合技术可以去掉冗余信息,降低单位时间内传输的数据量从而降

低能耗。同时,还需确保单位时间内传输的数据都是有效的,这样才能真正有利于网络的整体能量节约。

文章主要探讨两个方面的关键技术问题。一是通过数据融合技术来减少传输的数据量,二是通过采集数据与其他信息的融合来提高数据的准确度或者是识别的精确度。对于信号处理一般有两种模型:集中式和分布式。在集中式模型中每一个节点将数据传到协调器,由协调器负责数据处理并输出,这种方法虽然减少了计算量但却增大了消耗能量。协作式模型是在节点上进行数据处理,一个节点收到其他节点传来的数据,然后进行局部处理,使数据减少。这种方法虽然对节点的复杂度要求较高,但在能耗处理方面是比较令人满意的,因为传输处理过的数据比原始数据消耗的能量少。与集中式数据融合相比,分布式融合具有并行处理的优点且具有更好的容错性。我们提出了一种能量最优化技术,通过处理网络内部传输数据使通

信能量消耗降到最低。其核心思想是在数据传输之前进行缓存,然后与其他数据源提供的数据进行融合后再发送,形成一个大的数据包。因为传输的数据包越大,每比特消耗的能量越少。另外,通过设计传感器节点上的轻量级数据融合算法使得待传输的数据量变为最小,从而从根本上降低整个系统的能耗。在 WBAN 中,虽然临近的节点传感器相互之间无线资源竞争激烈,但是传送的数据往往存在一定的冗余,时间和空间上存在很强的相关性。我们可以利用不同节点之间测量数据的相关性,以及节点之间的相互窃听来减少数据的传输量。例如在室内环境下,根据安装在人体大腿上的惯性传感器来提供动作数据,同时根据光学运动传感器获取人体的位置信息,再通过动作数据与位置信息的融合来识别人体活动,提高根据单一传感器获得的数据准确度。

(待续)

#### 参考文献

[6] ASTRIN A W, LI H -B, KOHNO R.

Standardization for body area networks [J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, E92.B (2):366-372.

[7] 陆凯. 无线体域网(WBAN)通信关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2009.

[8] KHASNABISH B. Smart body sensor object networking [J]. ZTE Communications, 2014, 20(3):12-16. doi: 10.3939/j.issn.1673-5188.2014.03.005.

[9] YAZDANDOOST K Y, SAYRAFIAN-POUR K. Channel Model for Body Area Network (BAN) [Z]. IEEE 802.15 Working Group Document, IEEE 802.15-08-0033-05, 2008.

[10] FOULADI S H, SANTIAGO R C, FLOOR P A, et al. A survey on sensing, signal processing and communication for wireless body area networks [J]. ZTE Communications, 2014, 20(3):18-22. doi: 10.3939/j.issn.1673-5188.2014.03.001.

#### 作者简介



陈文, 上海交通大学电子信息与电气工程学院责任教授、信号处理与系统研究所所长, 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院院长; 主要研究方向为网络编码、协作通信和绿色通信等; 先后主持国家“973”课题、子课题, 负责国家级基金二十余项; 已发表 IEEE 期刊论文

51 篇、IEEE 国际会议论文 100 余篇。

## 综合信息

### 中国联通主导发布首个网络即服务国际标准

2014 年 9 月 11 日消息, 近日由中国联通主导的云计算标准 Y.3512 (Y.CCNaaS) 云计算-网络即服务功能需求获得 ITU-T 正式批准, 并在 ITU-T 官网预发布。该标准是国际上首个云计算-网络即服务标准, 也是云计算及下一代互联网标准化进程的重要里程碑。该标准的发布, 标志着中国在云计算和下一代互联网标准化领域取得突破性进展, 必将逐步影响后续云计算和下一代互联网国际标准的研究和制订。

ITU-T Y.3512 首次从运营商承载网和数据中心网络角度将云计算业务带来的功能需求进行标准化, 旨在应对云计算等新兴业务对传统运营商承载网和数据中心组网的挑战。

该标准严格依照应用牵引需求的方式明确 NaaS 互联、NaaS 平台、NaaS 应用的功能需求。其典型应用包括 IP 与光融合、灵活可扩展的 VPN、按需带宽调整、按需

网络性能调整、优化的流量工程、虚拟路由器、业务链、云化 CDN 等, 其中大部分由中国联通结合承载网和数据中心网络实际需求提出并获得采纳。

ITU-T Y.3512 标准于 2012 年 4 月由中国联通发起、2013 年 2 月 ITU-T 正式立项, 中国联通担任项目主编辑, 历时 19 个月获得发布。该标准在制订过程中, 获得了来自法国电信、波兰电信、中兴通讯、上海贝尔、微软、韩国 ETRI 等全球主流电信运营商、设备制造商、软件提供商、科研机构的官方支持和积极参与, 具有坚实的产业基础和深远的业界影响力。

与此同时, 中国联通还在 ITU-T 主导制订 Y.3512 系列标准 Y.CCNaaS-arch (云计算-网络即服务功能架构)。该标准基于 Y.3512 对 NaaS 互联、NaaS 平台、NaaS 应用的功能需求, 将 SDN 和 NFV 作为支撑技术, 提出相应的功能架构, 有望于 2016 年正式发布。

(转载自《中国信息产业网》)

## 2015年第1—3期专题征文

### 第1期

### 自组织异构小基站网络

#### 专题策划人

北京邮电大学网络技术研究院 张平 教授

为了适应未来移动通信业务的大容量、信息密度非均匀等新特征,高密度异构小区组网成为5G移动通信系统的关键技术,其中异构小基站因为其部署灵活、成本低廉而成为近几年业界普遍关注的技术。异构小基站网络具有自部署、高密度等特点,这使得传统蜂窝小区的经典问题遇到了新的挑战。在这种情况下,一种可选的技术路线即是将自管理、自优化、自愈合等自组织网络的思想和方法应用在异构小基站网络的管控中,采用机器学习、反馈控制、人工智能、进化理论等新理论和方法设计自组织异构小基站网络,实现高密度异构小基站灵活、高效的管控。本专题将在5G的背景下,深入探讨自组织异构小基站网络的架构、理论、技术、方法和实现。

专题文章范围主要包括:

- 面向5G的自组织异构小基站网络的理论和功能架构
- 适应5G移动通信业务特征的异构小基站组网研究
- 针对异构小基站网络的多用户信息论研究
- 高密度异构小基站网络吞吐量、覆盖、可靠性等关键性能分析
- 自组织异构小基站网络的新型资源分配、干扰管理和负载均衡方案
- 面向5G的高密度小基站的移动性管理技术

### 第2期

### 移动云计算和云服务

#### 专题策划人

中国联通网络技术研究院 唐雄燕 首席专家

随着移动智能终端的日益普及和移动宽带的加速发展,基于移动终端的移动云服务有着广阔的市场前景和创新空间。

端管云的协同不仅能为用户提供无处不在的优质服务体验,也带来了更高效的资源利用和更灵活的业务创新。移动云计算既是新兴的ICT技术,也是新兴的业务应用,在发展中还面临技术标准、商业模式、服务质量保障和安全等问题。本专题将重点关注移动云计算和云服务相关领域的技术、业务和产业现状及趋势,探讨移动云计算发展中的机遇和挑战。

专题文章范围主要包括:

- 移动云计算技术现状和趋势
- 移动云计算技术和产业标准
- 创新的移动云服务应用
- 面向移动云服务的网络技术
- 端管云协同技术和方案

### 第3期

### 移动互联网安全技术

#### 专题策划人

北京航空航天大学电子信息工程学院 刘建伟 教授

移动互联网所面临的安全和隐私保护问题越来越突出,已经严重阻碍了移动互联网的推广应用,特别是云计算技术与移动互联网的结合带来了一系列新的安全挑战。传统的网络安全防护技术已经力不从心,人们必须采用全新的技术方案来解决移动互联网的安全和隐私保护问题。目前,全球的学者和安全企业正在花大力气研究移动互联网的安全和隐私保护技术,并取得了一些创新性成果。本专题将针对移动互联网的安全和隐私保护问题,深入而广泛地探讨近年来在移动互联安全及隐私保护领域所出现的新技术、新方法和新应用。

专题文章范围主要包括:

- 移动互联网的安全体系结构研究
- 云计算应用模式下移动互联网安全问题研究
- 智能移动终端的病毒查杀和恶意软件清除技术研究
- 智能移动终端的安全及隐私保护技术
- 安全可信智能移动终端的技术研究及产品研发
- 3G/4G蜂窝通信网络安全技术研究

## 2015年第1—6期专题计划

期次	专题名称	专题策划人
1	自组织异构小基站网络	北京邮电大学网络技术研究院 张平 教授
2	移动云计算和云服务	中国联通网络技术研究院 唐雄燕 首席专家
3	移动互联网安全技术	北京航空航天大学电子信息工程学院 刘建伟 教授
4	软件定义光网络	复旦大学信息科学与工程学院 迟楠 教授
5	虚拟运营业务和网络	工业和信息化部电信研究院 续合元 总工
6	移动群智感知和协同计算	北京邮电大学软件学院 王文东 教授



# 《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,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) 作者需登陆《中兴通讯技术》投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper),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个月左右的时间。

### 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:题名、作者姓名、作者单位、中文摘要、关键词(4~8个)、英文摘要、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,150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性,采用第三人称的写法。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家和国际标准。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) 参考文献以20条左右为宜,未公开发表的资料不宜列入。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。主要种类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): 起止页码.
  - 书籍[序号]作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
  - 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): 起止页码.
  - 学位论文[序号]作者. 题名[D]. 保存地点: 保存单位, 授予年.
  - 专利[序号]专利所有者. 专利题名. 国别: 专利号[P]. 出版日期.
  - 国际、国家标准[序号]标准编号, 标准名称[S].
- (9) 作者原则上不超过3人,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2寸正面、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) 尽可能标注出研究课题的资助基金或资助项目名称。
- (12) 作者姓名中含有多音字时,应标注作者姓名的汉语拼音。
- (13) 提供联系方式,如:通信地址、电话(含手机)、Email等。

### 3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。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,本刊享有文章的版权(包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版)。作者获得的稿费包括版权酬金。如对此持有不同意见,请在投稿时说明。

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

联系电话:0551-65533356, 联系邮箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper)

# 中兴通讯技术

ZHONGXING TONGXUN JISHU

双月刊 1995 年创刊 总第 118 期  
2014 年 10 月 第 20 卷第 5 期

主管:安徽省科学技术厅  
主办:安徽省科学技术情报研究所  
中兴通讯股份有限公司  
编辑:《中兴通讯技术》编辑部

总编:孙枕戈  
副总编:赵今明  
常务副总编:黄新明  
责任编辑:杨勤义  
编辑:徐烨, 卢丹, 朱莉, Paul Sleswick  
排版制作:余刚  
发行:王萍萍  
编务:王坤

ZHONGXING TONGXUN JISHU

《中兴通讯技术》编辑部  
地址:合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 12 楼  
邮编:230061  
网址: [www.zte.com.cn/magazine](http://www.zte.com.cn/magazine)  
投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper)  
电子信箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)  
电话: (0551)65533356  
传真: (0551)65850139

出版、发行:中兴通讯技术杂志社  
发行范围:全球发行  
印刷:合肥中建彩色印刷厂  
出版日期:2014 年 10 月 10 日  
刊号: ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN  
广告经营许可证:皖合工商广字 0058  
定价:每册 20.00 元, 全年 120.00 元