



信息通信领域产学研合作特色期刊
第三届国家期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

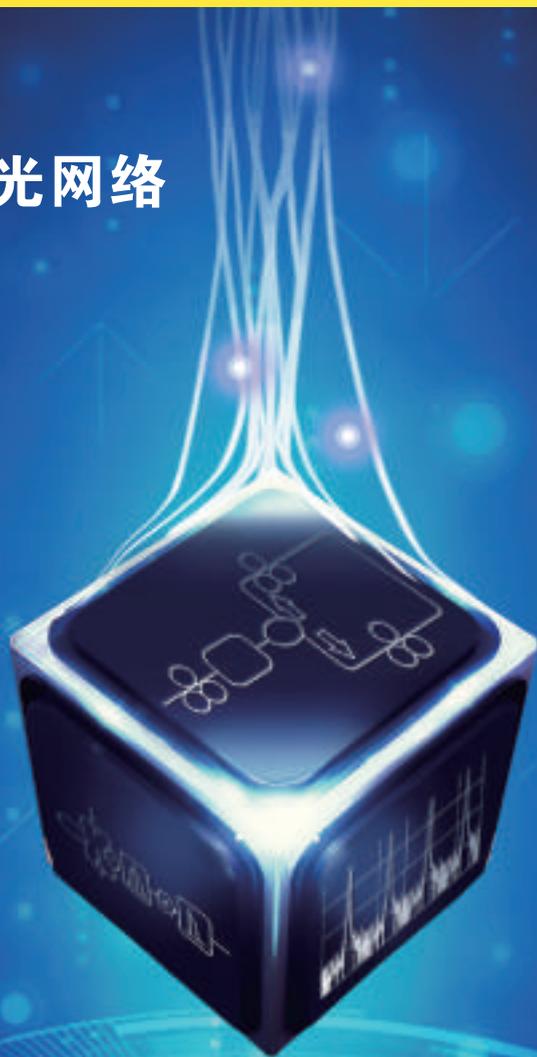
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2015年8月 • 第4期

专题：软件定义光网络



中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

二〇一五年六月

第二十一卷第四期

总第一二三期



《中兴通讯技术》第7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）

副主任 马建国（天津大学电子信息工程学院院长） 陈前斌（重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长）

编委（按姓氏拼音排序）

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 曹淑敏 中国信息通信研究院院长 | 孙枕戈 中兴通讯股份有限公司副总裁 |
| 陈建平 上海交通大学教授 | 孙知信 南京邮电大学物联网学院院长 |
| 陈杰 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 谈振辉 北京交通大学教授 |
| 陈前斌 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长 | 唐雄燕 中国联通网络技术研究院首席专家 |
| 葛建华 西安电子科技大学通信工程学院副院长 | 田文果 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 管海兵 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长 | 童晓渝 中电科软件信息服务有限公司副总经理 |
| 侯为贵 中兴通讯股份有限公司董事长 | 王京 清华大学教授 |
| 洪波 中兴发展股份有限公司总裁 | 王文东 北京邮电大学软件学院副院长 |
| 洪伟 东南大学信息科学与工程学院院长 | 卫国 中国科学技术大学教授 |
| 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 | 吴春明 浙江大学计算机科学与技术学院教授 |
| 江华 中兴通讯股份有限公司副总裁 | 邬贺铨 中国工程院院士 |
| 蒋林涛 中国信息通信研究院科技委主任 | 徐安士 北京大学教授 |
| 李红滨 北京大学教授 | 续合元 中国信息通信研究院通信标准研究所总工程师 |
| 李建东 西安电子科技大学副校长 | 薛一波 清华大学教授 |
| 李军 清华大学信息技术研究院院长 | 杨义先 北京邮电大学教授 |
| 李乐民 中国工程院院士, 电子科技大学教授 | 杨震 南京邮电大学校长 |
| 李融林 华南理工大学教授 | 尤肖虎 东南大学教授 |
| 李少谦 电子科技大学通信与信息工程学院院长 | 张宏科 北京交通大学教授 |
| 李涛 南京邮电大学计算机学院院长 | 张平 北京邮电大学网络技术研究院执行院长 |
| 李星 清华大学教授 | 张云勇 中国联通研究院副院长 |
| 刘建伟 北京航空航天大学电子信息工程学院党委书记 | 赵慧玲 中国电信股份有限公司北京研究院总工程师 |
| 马建国 天津大学电子信息工程学院院长 | 赵先明 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 孟洛明 北京邮电大学教授 | 郑纬民 中国计算机学会理事长、清华大学教授 |
| 糜正琨 南京邮电大学教授 | 钟义信 北京邮电大学教授 |
| 庞胜清 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 钟章队 北京交通大学计算机与信息技术学院院长 |
| 史立荣 中兴通讯股份有限公司总裁 | 周亮 南京邮电大学通信与信息工程学院副院长 |
| | 朱近康 中国科技大学教授 |



信息通信领域产学研合作特色期刊
第三届国家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
1995年创刊

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。

Contents 目次

中兴通讯技术 总第123期 第21卷 第4期 2015年8月

02	软件定义光/包交换混合网络的统一控制架构及关键技术研究	郑小平, 华楠
06	OFDM 光网络中软件定义的信号传输性能优化	朱庆明, 彭继宗, 苏翼凯
11	3S Networking: 面向业务、安全增强的软件定义网络	李赛飞, 邢焕来, 闫连山
15	SDN/NFV 技术接入网应用	沈成彬, 蒋铭, 曾涛
20	软件定义光网络光码分多址编解码技术发展趋势	蒲涛, 孟凡秋, 赵继勇
25	SDN 在传送网络的引入与应用分析	汤进凯, 张奇, 徐昕
30	在 SDON 中面向成本优化的虚拟光网络映射方法	陈博文, 王晓玲, 沈纲祥
36	软件定义光网络的编码方法与应用	肖江南, 余建军, 迟楠

专家论坛

41	软件定义网络中网络诊断的思考和探索	赵宇粟, 张鹏飞, 金耀辉
45	网络功能虚拟化标准及技术探讨	赵慧玲, 解云鹏, 胡晓娟

企业视界

51	ICT 融合趋势下的半导体技术和市场发展趋势	王晓明
----	------------------------------	-----

技术广角

58	CoLoRCache: 智慧协同网络中一种协作缓存机制	张萌, 周华春, 罗洪斌
----	-----------------------------------	--------------

综合信息

纪念杂志社成立 20 周年编委会暨 2015 通信热点技术研讨会在黄山隆重召开 (35)	2019 年全球宽带接入市场将达 120 亿美元 (40)	GSA: 全球已经推出 422 张 LTE 商用网络 (40)	2025 年全球 5G 收入将突破 650 亿美元 (50)	《中兴通讯技术》第 7 届编辑委员会新增编委简介 (57)
--	-------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	-------------------------------

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*64*zh*P* ¥ 20.00*15000*12*2015-08

Contents 目次

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 21 No. 4 Aug. 2015

Special Topic: Software-Defined Optical Networks

- 02 Unified Control Architecture and Key Technologies for Hybrid Packet-Optical Networks ZHENG Xiaoping, HUA Nan
- 06 Signal Transmission Performance Optimizations in Software-Defined OFDM Optical Networks ZHU Qingming, PENG Jizong, SU Yikai
- 11 3S Networking: Service-Oriented, Security-Enhanced and Software-Defined Networking LI Saifei, XING Huanlai, YAN Lianshan
- 15 Applications in Access Network of SDN/NFV Technology SHEN Chengbin, JIANG Ming, ZENG Tao
- 20 OCDMA Endencoding Technology Trends for Software-Defined Optical Networks PU Tao, MENG Fanqiu, ZHAO Jiyong
- 25 SDN in Transmission Network and Application Analysis TANG Jinkai, ZHANG Qi, XU Xin
- 30 Cost-Optimized Virtual Optical Network Mapping Approaches in Software-Defined Optical Networks CHEN Bowen, WANG Xiaoling, SHEN Gangxiang
- 36 Methods and Applications of Code in Software-Defined Optical Networks XIAO Jiangnan, YU Jianjun, CHI Nan

Expert Forum

- 41 Network Debugging in Software-Defined Network ZHAO Yusu, ZHANG Pengfei, JIN Yaohui
- 45 Standard and Technology of Network Function Virtualization ZHAO Huiling, XIE Yunpeng, HU Xiaojuan

Enterprise View

- 51 The Development Tendency of Semiconductor Technology and Marketing in ICT WANG Xiaoming

Technology Perspective

- 58 CoLoRCache: Cache Cooperation Mechanism in Smart and Cooperative Networks ZHANG Meng, ZHOU Huachun, LUO Hongbin

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。



迟楠

复旦大学教授、博士生导师,中国光学学会纤维与集成光学专委会常委委员,中国通信学会光通信专委会委员,美国光学学会战略规划委员会委员;主要研究方向为高谱效率光编码和光调制、超高速可见光通信和光交换网络;先后获得教育部新世纪优秀人才、上海市曙光学者等奖项;承担多项国家“973”项目课题、自然科学基金重点项目子课题等;在光通信领域国际期刊和学术会议上发表论文250余篇,SCI论文总数124篇,SCI他引数750余次,国际会议特邀报告20余次。

专题导读

软件定义网络(SDN)是近年来网络通信领域最重要的创新之一。作为一种新型的网络构架,SDN通过将网络设备面与数据面分离开,从而实现网络流量的灵活控制,为核心网络及应用的创新提供良好的平台。SDN不仅对互联网、数据中心互联产生重要的影响,也将对光网络产生深远的影响,但将SDN应用到光网络中时,需要考虑到光网络的特殊性,包括物理传输损伤、网络性能的约束以及按需分配带宽的要求。

SDN光网络的关键技术包括3个方面:首先是软件驱动的传输光路的切换与调节,光收发机参数可以在线调节,使得光链路成为物理性能可感知、可调节的动态系统;其次是软件编程的光路灵活交换,波长间隔无关的可编程ROADM技术在全光交换过程中可以打破传统波长通道固定栅格划分,可支持全光汇聚与疏导,为实现高谱效率、速率灵活的光路配置和带宽管理提供了全新思路;最后是软件扩展的光路自动联网,根据用户和网络状态需求,利用可编程控制的器件、算法、策略与协议,定制内核高度重构化的网络系统,实现异构网络资源的归一化调度与业务应用高质量保证。

同时SDN光网络也面临诸多挑战,SDN光网络设备开发、系统升级与运行维护管理方面都面临降低成本的压力,SDN光网络还需要通过带宽灵活调度、流量动态疏导、性能可感知等方面进一步增加网络的灵活性,SDN网络还需要提升效率,实现控制和数据转发分离、设计通用模块并进行绿色节能的管理。

SDN光网络的技术正在不断演进与发展,将给未来光网络带来变革,但由于光网络属性与传统网络不通,SDN在光层上的可编程控制和资源虚拟化面临更多挑战。我们这期专题主要和大家一起来讨论技术层面上的问题。这些论文凝聚了作者多年的研究成果和工作经验,希望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!

迟楠

2015年7月10日

2015年第1—6期专题计划

1

自组织异构小基站网络

张平 北京邮电大学网络技术研究院 执行院长

2

移动云计算和云服务

唐雄燕 中国联通网络技术研究院 首席专家

3

移动互联网安全技术

刘建伟 北京航空航天大学电子信息工程学院 教授

4

软件定义光网络

迟楠 复旦大学信息科学与工程学院 教授

5

虚拟运营业务和网络

续合元 中国信息通信研究院通信标准研究所 总工

6

移动群智感知和协同计算

王文东 北京邮电大学软件学院 副院长

软件定义光/包交换混合网络的统一控制架构及关键技术研究

Unified Control Architecture and Key Technologies for Hybrid Packet-Optical Networks

郑小平/ZHENG Xiaoping
华楠/HUA Nan

(清华大学, 北京 100084)
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0002-004

摘要: 围绕光承载网和 IP 数据网的互通问题展开论述, 并基于对光承载网和 IP 数据网不同交换特点和定位的分析, 提出了基于软件定义光/包交换混合网络的统一控制架构和关键技术, 实现了跨 IP 数据网和光承载网的快速端到端无缝业务建立。

关键词: 网络异构化; 网络动态互通; 光承载网; IP 数据网; 软件定义网络; 光/包交换混合网络

Abstract: This paper discusses problem of connection between a core optical transport network and IP networks. We present a unified control architecture that uses some key technologies for hybrid packet-optical networks based on the analysis of their different switching features and positions to finally realize fast and seamless end-to-end connection.

Keywords: network heterogeneity; dynamic network inter-connection; core optical transport networks; IP networks; software-defined networks; hybrid packet-optical networks

1 引言

随着以信息技术为核心的新一轮科技革命正在孕育兴起, 网络基础设施建设成为保障国民经济正常运行和创新驱动发展的先导力量。Cisco 数据表明^[1], 未来全球网络的流量和联网的终端数将急剧上涨。考虑到云计算服务、云存储服务等新型数据业务的快速发展, 网络带宽的需求将会持续高速增长。业务的高带宽需求推动网络朝着大容量、大规模、动态化和异构化方向发展。

网络的容量和规模不断扩大, 其控制和管理将变得异常困难。同时, 业务的动态实时性需求也给大规模网络的管控机制提出了新的要求。当前, 应对这种变化的主流思想是对网络进行分域控制和管理。网络根据功能用途、地理位置、管理区域和设备类型等因素被划分为多个独立的子网(域)。每个子网拥有私密的

物理拓扑、技术细节、运营策略, 且有可能属于不同的网络运营商, 呈现出明显的异构化特征。梅特卡夫定律告诉我们, 网络的价值与网络规模的平方成正比, 这就要求这些异构子网实现动态互通, 以创造其最大价值。然而, 网络异构化严重影响了网络动态互通, 成为了阻碍网络发展的重大“瓶颈”^[2-3]。网络异构化是一个广泛的概念, 它包含多个层次的含义, 如核心光承载网的异构化、光承载网与 IP 数据网的异构化、固网与无线/移动网络的异构化等等。解决网络异构化带来的网络互通问题需要循序渐进, 而非一蹴而就的过程。

1.1 核心光承载网的异构互通

随着核心光承载网规模的扩大

和光通信技术的发展, 其传送平面、控制平面和管理平面不同程度地出现了异构化的趋势。传送平面的异构化来源于交换技术的不同和设备制造商的实现技术不同, 控制平面的异构化来源于控制技术的发展程度不同, 管理平面的异构化来源于底层资源的表述不同。在目前的多域光网络环境中, 子网传送平面之间可以实现互通, 保证光信号在异构传送设备间顺利地收发。然而, 子网间的动态互通仍不能实现, 主要在于异构子网网控管平面之间不能实现互通^[4-5]。

可实现多域光网络动态互通的典型架构主要有集中式的统一网络管控架构(GNMS)^[6]和分布式的外部网间接口(E-NNI)管控架构^[7]。

集中式管控架构采用集中控制

收稿日期: 2015-05-27

网络出版时间: 2015-06-22

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)计划(2014CB340104、2014CB340105); 国家自然科学基金项目(61201188、61321004)

器通过统一的北向接口连接各个子网的管控平面,从而实现全网集中控制和管理。在该架构中,集中控制器知晓全网资源信息,可在最大程度上实现跨域路由优化。然而,集中控制器存储所有子网的资源和业务信息,不仅破坏了子网信息私密性,同时向集中控制器同步全网信息也极大地增加了控制器负担,限制了网络扩展性。此外,由于各子网控管平面的私有接口和信令协议不同,北向接口开发的难度大,集中控制器设计也非常复杂。

与集中式管控架构不同,基于E-NNI的分布式架构通过子网间两两适配的方式实现互通,有利于网络扩展,而采用子网拓扑抽象有利于降低子网间交互的信息量。然而,由于不同厂商的域内私有信令协议不同,因此很难定义一个满足异构光网络要求的通用域间信令接口,尤其是在多厂商情况下该问题更加显著。即便E-NNI架构可以解决现有光网络的异构互通问题,也难以保证其同样适用于未来新出现的网络技术。

为克服上述架构的缺陷,解决异构光承载网的动态互通问题,我们在2011年提出了基于域间连接控制单元(ICCE)和路径计算单元(PCE)的异构光网络管控架构(PIONEER)^[8]及其关键技术^[9-12]。PIONEER是一种域内集中与域间分布相结合的管控架构。该架构在通用域间管控平面中采用统一的域间通信协议,并引入适配平面消除了不同子网之间的异构性,从而能够在保证良好子网信息私密性和网络扩展性的前提下实现异构子网互通。2014年,我们基于PIONEER架构在商用设备平台上实现了全球首次跨3个设备商路由域的端到端动态连接建立^[13-14]。

1.2 光承载网和IP数据网的互通

随着移动通信、宽带接入、数据中心、云计算等数据业务的飞速发展,IP数据网的重要性与日俱增,仅

实现核心光承载网的异构互通是远远不够的。为了支持端到端数据业务的动态按需建立和灵活资源调度,光承载网和IP数据网的互通与融合至关重要且迫在眉睫:离开了光网络的大带宽通道建立,IP数据网将面临高成本、高能耗和扩展性的“瓶颈”;同样,没有IP数据网的支持,光网络过大的交换粒度将导致其巨大的带宽资源无法被充分利用,并难以实现业务调度的高实时性和灵活性^[15]。

然而,由于基于分组交换的IP数据网和基于电路交换的光承载网的交换机制和组网模式有本质不同,二者的动态互通和统一控制难度非常大,需要面对众多技术挑战。

近年来,在IP网络领域兴起的软件定义网络(SDN)概念为解决光承载网与IP数据网的互通融合提供了可行思路。然而,与单一IP网络的控制不同,光/包交换统一控制架构需要考虑光网络物理层的限制,例如光功率、物理损伤、信号可达性、连接建立速率、可用带宽、交换粒度等^[16]因素。同时,由光网络与IP网络的业务建立方式和延时差异导致的业务建立和故障恢复时的协同控制问题也是需要解决的“瓶颈”问题。已有研究表明,商用光承载网的业务建立延时即使在小规模情况下也将至少达到几百毫秒到几秒量级^[13-14],这对于IP数据网来说明显过高,构成光网络与IP网络互通的巨大障碍。

针对上述光网络与IP网络互通问题,本文将对我们提出的基于软件定义光/包交换混合网络的统一控制架构和基于该架构的光网络资源缓存技术进行介绍分析。

2 基于软件定义的光/包交换混合网络的统一控制架构

2.1 光/包交换混合网络统一控制架构

为了将基于IP网络的SDN控制架构扩展至可支持光/包交换混合网

络,我们提出了全新的“超级虚拟路由器”概念。如图1所示^[17]。我们将每一个连通的同构或异构光承载网视作一个“超级虚拟路由器”,并通过一个支持OpenFlow协议的虚拟路由器代理与SDN控制器相连。采用这种架构,无需对现有基于IP网络的SDN架构和协议进行本质改变或扩充便可实现光/包交换混合网络的统一控制。同时,该架构保留了现有光承载网的控制平面,规避了SDN控制器对存在物理层限制的光承载网的动态控制难题。

2.2 网络实验和结果分析

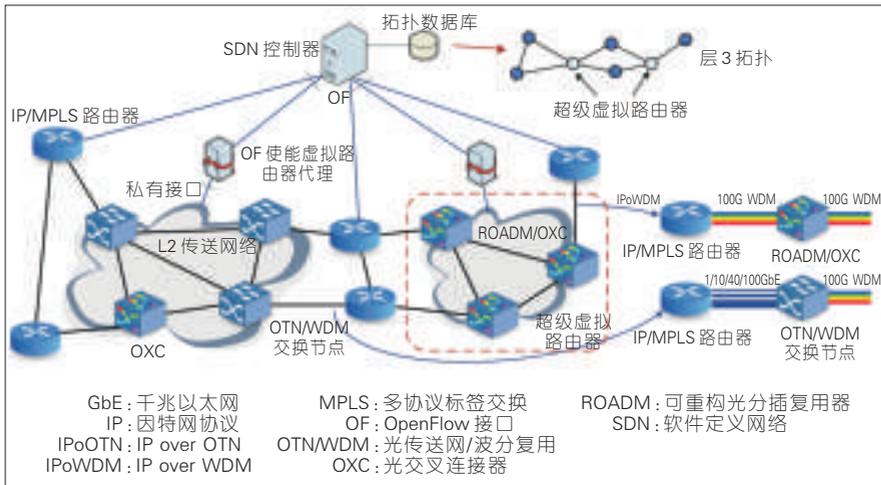
我们搭建了光/包交换网络实验平台验证所提出的基于软件定义的光/包交换混合网络的统一控制架构。实验平台搭建如图2所示,其包含2个IP路由域和一个光传送网(OTN)域。其中,IP路由域由盛科V330 OpenFlow交换机和PC终端组成;在OTN域,通过思科商用交换机模拟OTN交换节点。整个光/包交换混合网络由一个POX开源SDN控制器进行集中控制。

在该实验平台上,我们实现了从终端2到终端14的FTP业务和视频业务的建立,并得到了其平均业务延时。我们对延时构成进行了分段统计(如图3所示),可以很明显看到,无论是FTP业务还是视频业务,IP域和OTN域之间均存在着巨大的业务建立延时差异,后者贡献了全部端到端延时的绝大部分。为了消除延时差异的负面影响并实现低延时光/包交换混合网络,我们在所提出的光/包交换混合网络统一控制架构中引入了光网络的资源缓存技术。

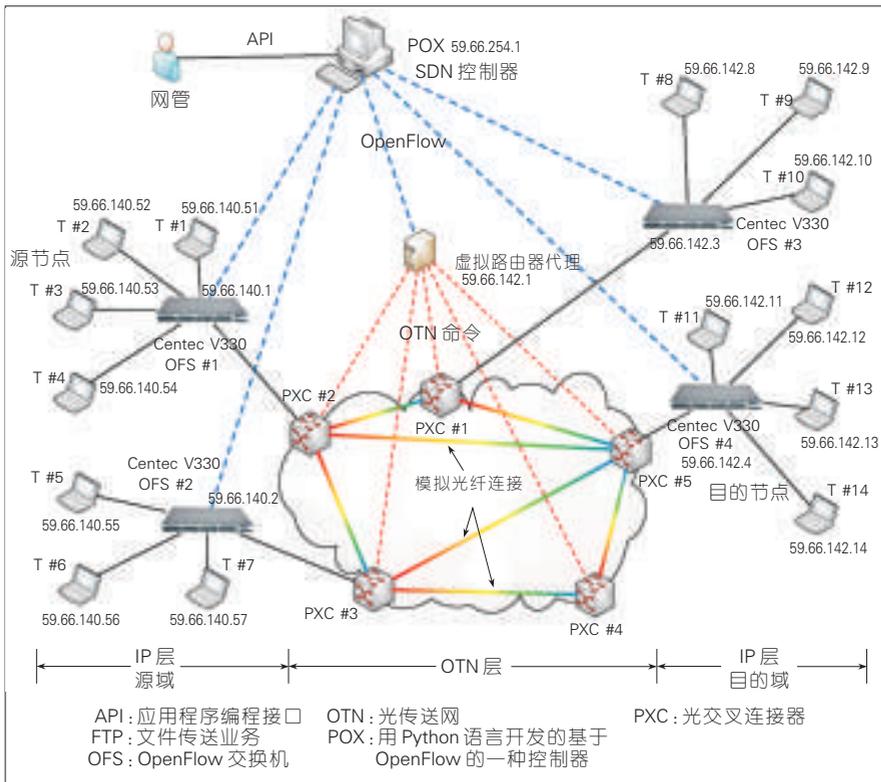
3 核心光承载网的资源缓存技术

3.1 光/包交换统一控制网络的资源缓存

光网络资源缓存的概念于2008



▲图1 基于“超级虚拟路由器”的光/包交换混合网络统一控制架构



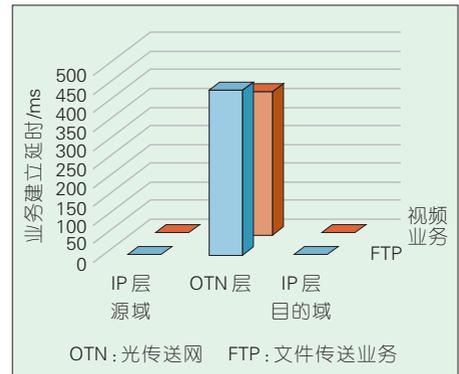
▲图2 光/包交换网络实验平台

年被提出,其目的是吸收高强度瞬时业务负载对光网络的冲击^[18]。我们将这个概念引入基于软件定义的光/包交换混合网络的统一控制架构中,以消除IP数据网和光承载网之间的巨大业务建立延时差异,从而实现快速无缝的业务建立。

基于资源缓存的光/包交换混合

网络业务建立如图4所示。我们利用光网络的一小部分资源建立“缓存区”(其余资源构成“负载区”),在缓存区预先为每个光网络边缘节点对(对应“超级虚拟路由器”的一组出入口端口)建立一定带宽的固定通道。

当IP数据业务请求光网络带宽时,首先利用这些固定通道为其提供



▲图3 分段业务建立延时

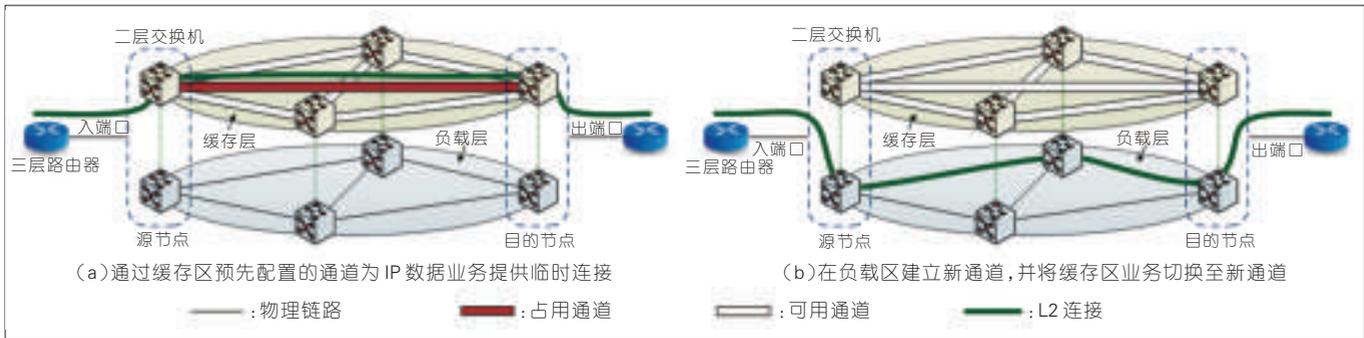
临时连接并传输数据(图4(a))。由于该操作不存在建路过程,仅需对原/宿节点的入/出端口进行配置,因此延时很短。与此同时,利用光网络控制平面在负载区为上述业务建立新通道,当新通道建立完成后,将缓存区的临时连接切换至负载区的新通道,完成整个业务建立流程(图4(b))。需要指出的是,由于切换过程不改变光网络对IP网络端口的配置,因此该过程对SDN控制器而言是不透明的,也就是说,SDN控制器对虚拟路由器和普通路由器的控制不存在本质区别。

如果IP数据业务集中到达导致光网络缓存区无可用资源提供临时连接,则直接在负载区为该IP数据业务建立新通道,这将大大增加端到端业务建立延时。可见,缓存区大小的分配对网络性能影响十分重大。缓存区分配过大会导致网络资源的浪费,而过小会增加业务平均建立延时,降低缓存作用。因此,需要建立分析模型确定合适的缓存区大小。

3.2 缓存命中率(BHR)分析模型

我们定义缓存命中率(BHR) p_{hit} 描述缓存区的利用效率,它被定义网络业务在缓存区成功建立的概率。如果可以推导出 p_{hit} 和业务到达率 λ 、服务率 μ 和缓存区大小 n 的解析关系,便可得到在一定业务强度下,满足BHR下限的最小缓存区大小。

对于每一个节点对 l ,其在缓存



▲图4 基于资源缓存的光/包交换混合网络业务建立

区的业务建立过程可以用 $M/G/n/n$ Markov 排队模型来描述。可以证明,其系统稳态概率和 $M/M/n/n$ 模型相同。我们用 p_k^l 表示节点对 l 连续时间 Markov 链在状态 k 的稳态概率(方程 1)。其中, λ_l 和 μ_l 分别表示节点对 l 的业务到达率和服务率。根据 Markov 链所有状态的稳态概率和为 1 (方程 2), 可得 p_0^l 的表达式(方程 3), 进而推得节点对 l 的缓存命中率 p_{hi}^l (方程 4)。全网缓存命中率 p_{hi} 可通过 p_{hi}^l 的数学期望求得(方程 5), 其中, L 和 $p(l)$ 分别表示网络中节点对的数量以及业务出现在节点对 l 的概率。如果业务均匀分布在各个节点对, 则 $p(l) = L^{-1}$, 且各节点对的到达率相同为 λ 。

$$p_k^l = \frac{\lambda_l^k}{k! \mu_l^k} p_0^l \quad (1)$$

$$\sum_{k=0}^n p_k^l = 1 \quad (2)$$

$$p_0^l = \left(\sum_{k=0}^n \frac{\lambda_l^k}{k! \mu_l^k} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$p_{hi}^l = 1 - p_n^l = 1 - \frac{\lambda_l^n}{n! \mu_l^n} / \left(\sum_{k=0}^n \frac{\lambda_l^k}{k! \mu_l^k} \right) \quad (4)$$

$$p_{hi} = \sum_{l=1}^L p_{hi}^l p(l) \quad (5)$$

$$p_{hi} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p_{hi}^l = \quad (6)$$

$$1 - \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{\lambda_l^n}{n! \mu_l^n} / \left(\sum_{k=0}^n \frac{\lambda_l^k}{k! \mu_l^k} \right)$$

此时, 方程 5 可简化为方程 6, 我

们便得到了 p_{hi} 的解析表达式。

3.3 性能仿真及分析

我们对采用了资源缓存技术的光/包交换混合网络统一控制架构的性能进行了网络仿真, 并与理论结果进行了对比。仿真采用 14 节点 NSFNET 拓扑, 同时假定所有 IP 数据业务均为 GbE 业务(在光承载网中映射为 ODU0), 符合泊松过程, 并均匀分布在各个节点对。缓存区的大小设定为 ODU0 的整数倍。负载区的连接建立时间由实际信令传输延时、路径计算时间、节点处理时间以及开关配置时间组成, 后三者设备参数分别设置为 1 ms、200 ms 和 5 ms^[13]。

图 5 对比了缓存区大小为 1 (ODU0) 时缓存命中率的仿真与理论值。可以看到, 由 3.2 节的 BHR 模型计算得到的理论值和仿真结果的吻合度相当高。当业务强度增加时, BHR 值明显减小, 此时需要增加缓存区大小以获得更高的缓存命中率。

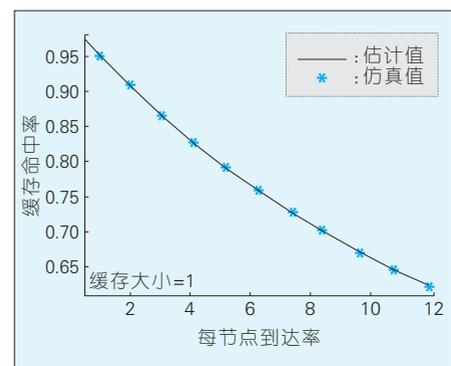
图 6 统计了采用和不采用资源缓存技术时, 端到端业务建立延时的分布。可以看到, 资源缓存技术显著降低了业务建立延时, 且低延时业务的比例随着缓存区增大而提高。

4 结束语

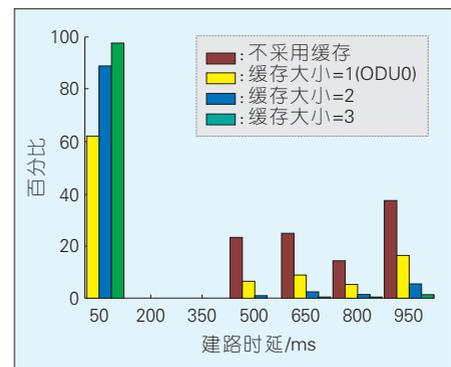
网络异构化包含多层次的含义, 即包括核心光承载网的异构化也包括光承载网与 IP 数据网的异构化。解决网络的异构互通问题是一个循序渐进的过程。目前, 核心光承载网

异构互通的解决方案和关键技术逐渐成熟, 然而, 由于交换机制的不同, IP 数据网与光网络的动态互通难度非常大, 目前尚未解决。本文围绕光承载网和 IP 数据网的互通问题展开论述, 并对我们提出的基于软件定义光/包交换混合网络的统一控制架构进行了介绍, 并且实现了 IP 数据网和光承载网控制的无缝融合。此外, 本文还介绍了基于统一控制架构的光网络资源缓存技术, 极大的降低了

►下转第 10 页



▲图5 缓存命中率理论和实验值对比



▲图6 端到端业务建立延时分布

OFDM 光网络中软件定义的信号传输性能优化

Signal Transmission Performance Optimizations in Software-Defined OFDM Optical Networks

朱庆明/ZHU Qingming
彭继宗/PENG Jizong
苏翼凯/SU Yikai

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

随着软件定义网络(SDN)等下一代网络技术的成熟,光网络中的网络资源管理显得日益重要。下一代光接入网要求实现更高的数据容量以及灵活的资源管理功能,正交频分复用(OFDM)技术具备卓越的抗码间干扰(ISI)能力、高频谱效率、透明传输及子载波独立调制的特点^[1-2],已经成为下一代光纤接入网的重要候选技术。

然而,传统 OFDM 调制技术存在较严重的频谱泄漏^[3]以及较高的峰均功率比(PAPR)^[4],这限制了 OFDM 技术的推广应用。已有 OFDM 旁瓣抑制技术包括时域加窗滤波^[5]、插入补偿载波^[6]、子载波预加重^[7]、自适应 OFDM 符号过渡^[8],然而这些方案只在无线领域中得到验证。光域 OFDM 旁瓣抑制技术包括正交频分复用/偏移正交幅度调制(OFDM/OQAM)^[9]、数字滤波^[10]、OFDM/OQAM 技术可以降低 OFDM 带外分量,但是会使信道估

收稿日期: 2015-04-30
网络出版时间: 2015-06-22
基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA013402、2015AA015503); 国家自然科学基金(61125504)

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0006-05

摘要: 针对正交频分复用(OFDM)光网络,提出两项 OFDM 传输性能优化技术,分别可以抑制 OFDM 信号的旁瓣分量和降低峰均功率比(PAPR)。通过在每个 OFDM 符号前插入一段软件定义的旁瓣抑制码(SSC),OFDM 信号旁瓣可以得到显著抑制,从而有效降低密集波分复用-正交频分复用(DWDM-OFDM)系统中的相邻载波干扰。此外,利用软件定义的方式更改保护频带(FGB),以降低 OFDM 信号的 PAPR,改善信号传输性能。通过实验对两项 OFDM 传输性能优化技术进行了验证。

关键词: 正交频分复用;旁瓣抑制;峰均功率比

Abstract: In this paper, we propose two techniques for optimizing transmission performance in OFDM networks. These techniques reduce the sidelobe component and PAPR of an OFDM signal. By inserting a software-defined sequence called sidelobe suppression code (SSC), the sidelobes of the OFDM signal are significantly suppressed, and the interference between adjacent channels in DWDM-OFDM systems can be reduced. Furthermore, we utilize frequency guard band (FGB) to reduce PAPR through software definition and improve transmission. Our two methods are validated by experiments.

Keywords: orthogonal frequency division multiplexing; sidelobe suppression; peak to average power ratio

计变得更加复杂^[11],数字滤波滤除旁瓣会引起信号失真。PAPR 降低技术主要包括 μ 律压扩变换^[12]、部分传输序列^[13]、子载波预留^[14],其中 μ 律压扩变换技术和部分传输序列技术会引起失真,而子载波预留技术缺乏传输性能优化的实验验证。

本文针对光网络提出两项 OFDM 传输性能优化技术,分别可以抑制 OFDM 信号的旁瓣分量以及降低 PAPR。

旁瓣抑制技术是在传统 OFDM 符号前加入一段软件定义的旁瓣抑制码(SSC),该序列由傅立叶变换-逆傅立叶变换(FFT-IFFT)循环迭代产

生,旁瓣抑制效果随迭代次数增加而提升。本文以实验和仿真一致验证了其旁瓣抑制效果,通过在传统 OFDM 序列中加入 5% SSC 序列,OFDM 信号的旁瓣可以被额外抑制约 18 dB。

SSC 技术是一项全新的密集波分复用-正交频分复用(DWDM-OFDM)系统频谱优化技术,可以使 DWDM-OFDM 系统中相邻载波间的干扰有效降低,提升系统误码性能。另一方面,我们以软件定义的方式更改 OFDM 系统中的保护频带(FGB),即在 FGB 中插入一组软件定义的频率分量(PRT),以生成尖峰消除 OFDM

(PC-OFDM)信号,从而得到 PAPR 降低约 2.5 dB 的效果。经实验验证,当入纤功率为 2.5 dBm,经 50 km 标准单模光纤 (SSMF) 传输后,相对于传统 OFDM 信号,PC-OFDM 信号的接收灵敏度提升约 2 dB。

1 旁瓣抑制码和尖峰消除正交频分复用技术工作原理

SSC 是针对 DWDM-OFDM 系统开发的频谱优化技术,其通过 FFT-IFFT 循环迭代产生,并具有显著的 OFDM 旁瓣抑制效果。

PC-OFDM 是基于传统 OFDM 调制方式的 PAPR 优化技术,其通过在 FGB 中插入一组软件定义的频率分量 (PRT),就可以成功地实现 PAPR 的降低。

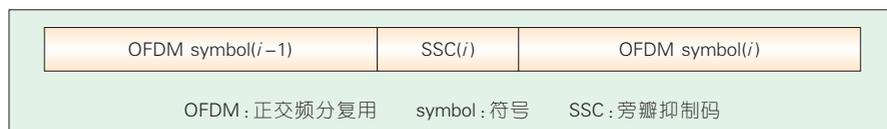
1.1 旁瓣抑制码

SSC 定义:对于任意一段包含 M 个符号且长度为 l 的 OFDM 序列 $syms$,在其中插入一段总长为 L_{SSC} 的序列,可以得到一个新序列 $syms'$,如果新序列的带外功率谱之和 sum 达到最小值,则插入的序列称为 SSC。

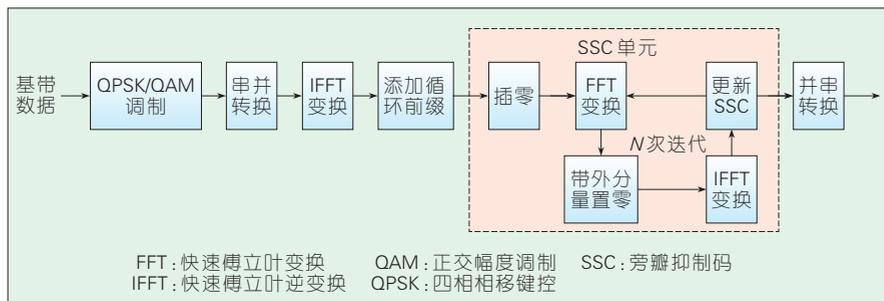
由于 sum 的值总是随着迭代次数的增加而减小,寻找最小值的意义并不大,通常只要迭代次数足够多, sum 的值足够小,即可以认为此时插入的序列为 SSC。

图 1 所示是 SSC 的典型结构,原有 OFDM 符号的结构被保留,仅在每个 OFDM symbol (i) 前插入一段软件定义的优化序列 SSC (i)。值得一提的是,SSC 性能与 OFDM 符号中循环前缀 (CP) 长度无关,若 CP 长度为 0,则 OFDM 符号中不包含 CP。

带有 SSC 单元的 OFDM 结构框图如图 2 所示,即在传统 OFDM 结构中



▲ 图 1 SSC 典型结构



▲ 图 2 带有 SSC 单元的 OFDM 结构

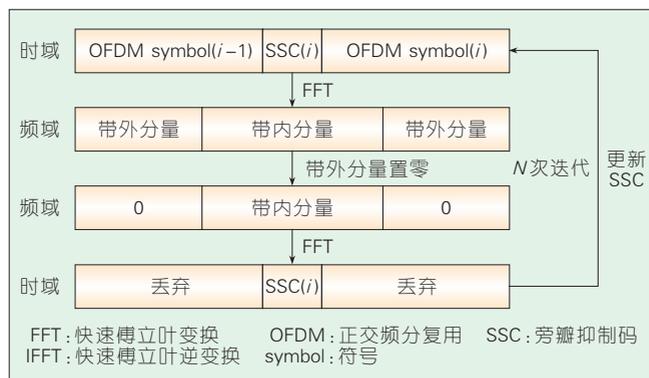


图 3
SSC 生成算法

插入 SSC 生成单元,更加详细的 SSC 生成算法如图 3 所示,一共分为 4 步进行。

(1) 将第 i 个 OFDM 符号,第 i 个 SSC 以及第 $i-1$ 个 OFDM 符号作为一个整体 $entity$ 进行 FFT 运算,得到其频谱。

(2) 将频谱上 OFDM 有效频带以外的分量置零。

(3) 对该频域序列做 IFFT 运算,得到其时域序列 $entity'$ 。

(4) 将 $entity'$ 中的 SSC 序列替换为 $entity'$ 中的 SSC。

SSC 具有显著旁瓣抑制效果的原因可以从频域和时域两个角度理解:

(1) 频域:在四步迭代算法中,其中第二步是将带外分量全部置零,不断进行这样的迭代操作可以使得正交频分复用信号频谱中的带外分量逐渐趋于 0,从而旁瓣可以得到很强

的抑制。

(2) 时域:既然单个 OFDM 符号的频谱无旁瓣分量,而两个或多个 OFDM 符号在时域上串行连接在一起,频谱上便会产生旁瓣,因此旁瓣存在的原因是人为地将多个频域及时域不相关的 OFDM 符号在时域上连接在一起,在每两个 OFDM 符号的交界处即会因为这种频域及时域上的突变而产生额外的干扰。因此可以在相邻两个 OFDM 符号间插入一段软件定义的优化序列 SSC。如图 3 所示,尽管 OFDM symbol ($i-1$) 和 OFDM symbol (i) 是不相关的,但是 OFDM symbol ($i-1$)、SSC (i)、OFDM symbol (i) 被当作一个整体做 FFT-IFFT 变换后,SSC (i) 和 OFDM symbol ($i-1$) 相关,也和 OFDM symbol (i) 相关,例如,设序列 a 和序列 b 是不相关的,但是可以产生序列 $c = (a + b)/2$, c 既和 a 相关,也和 b 相关。可以认为,SSC (i) 实际上在相邻两个 OFDM 符号的交界处起到一个频域及时域上的缓冲作用,交界处序列的相关性增强,突变减小,旁瓣也会相应得到

抑制。

1.2 尖峰消除正交频分复用

PC-OFDM 信号 $s_{PC-OFDM}$ 为原始 OFDM 信号 s_{OFDM} 与尖峰消除信号之和 s_{PC} , s_{PC} 根据(1)式迭代产生:

$$s_{PC}^{i+1} = s_{PC}^i + \alpha_i p[n - m_i] \quad (1)$$

式中 i 为迭代次数, $p[n]$ 为软件预定义的 PRTs 所产生的脉冲信号, $p[n - m_i]$ 为 $p[n]$ 循环移位 m_i 的结果, m_i 为 $s_{PC-OFDM}^i$ 中最大尖峰所在位置的下标, α_i 表征 $s_{PC-OFDM}^i$ 中最大尖峰与预设的信号最大幅度 A 之差, 即:

$$\alpha_i = -\frac{2}{3} \text{sign}[s_{PC-OFDM}^i(m_i)] |s_{PC-OFDM}^i(m_i) - A| \quad (2)$$

其中 $\text{sign}[\cdot]$ 为取符号函数, $-2/3$ 为仿真得到的最优参数, 根据均方差准则, $p[n]$ 可以定义为:

$$p = \frac{N}{\sqrt{N_{PRTs}}} \text{IFFT}(\prod_{PRTs}) \quad (3)$$

其中 N 为 OFDM 信号的长度, N_{PRTs} 为 PRTs 的数量, \prod_{PRTs} 为自定义的频谱分布, 即频谱上 PRTs 所在位置为 1, 数据载波所在位置为 0。

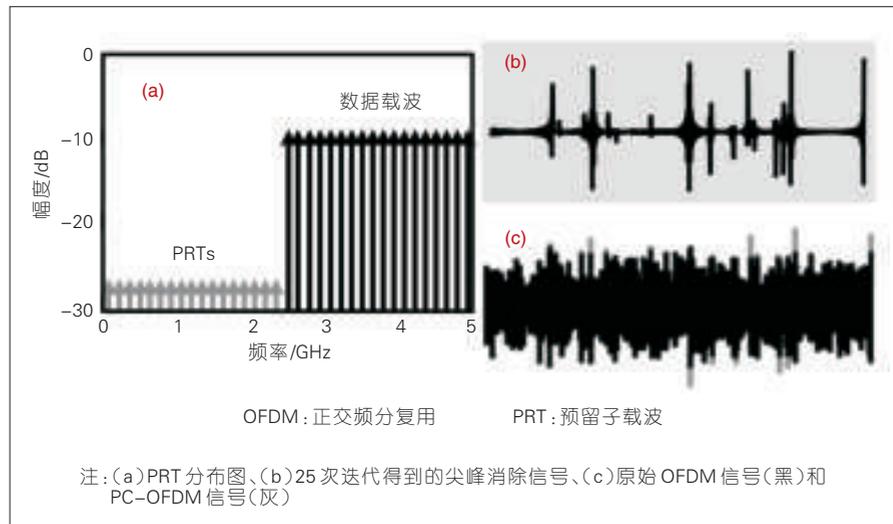
如图 4(a) 所示, PRTs 分布于低频的 FGB, 由 PRTs 产生的脉冲信号 $p[n]$ 是一个奈奎斯特脉冲。图 4(b) 为多个奈奎斯特脉冲叠加产生的尖峰消除信号, 图 4(c) 为原始 OFDM 信号与尖峰消除信号叠加产生的 PC-OFDM 信号。

2 实验验证

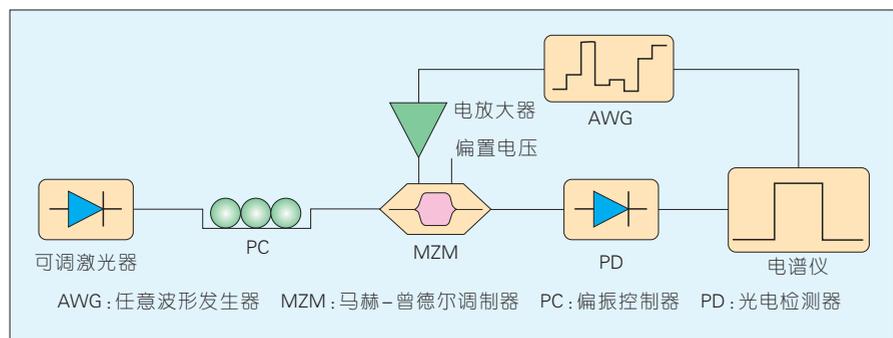
旁瓣抑制码技术与尖峰消除 OFDM 技术以独立的实验分别进行了验证。

2.1 旁瓣抑制码实验验证

SSC 的旁瓣抑制效果得到了实验和仿真的一致验证。实验装置如图 5 所示, 在发送端, 可调激光器 (SP TLS150D) 产生了一束波长达到 1 550.01 nm 的光载波经过偏振控制器 (PC) 入射进马赫-曾德尔调制器 (MZM) (Fujitsu FTM7921ER), 由任意



▲ 图 4 尖峰消除 OFDM 工作原理



▲ 图 5 实验装置

波形发生器 (AWG) (Tektronix AWG7122C) 产生的 OFDM 信号经过电放大器放大后驱动 MZM 调制光载波。MZM 的输出经过光电转换器 (PD) (Bookham PT10G4094) 转换为电信号, 并用电谱仪 (R&S FSUP) 观察其功率谱, 验证 SSC 在光域的性能, 同时用电谱仪观察 AWG 输出的 OFDM 信号的功率谱, 验证 SSC 在电域的性能, 并与光域结果进行对比。

仿真和实验均分别以不带 SSC 的 OFDM 序列和带 SSC 的 OFDM 序列为测试对象, 观察并对比其旁瓣抑制性能。两种 OFDM 序列的符号数均为 1 000, 子载波数为 64, FFT 长度和 CP 长度分别为 256、26, SSC 长度为 13, 迭代次数为 70, 采样率为 2.5 GHz。

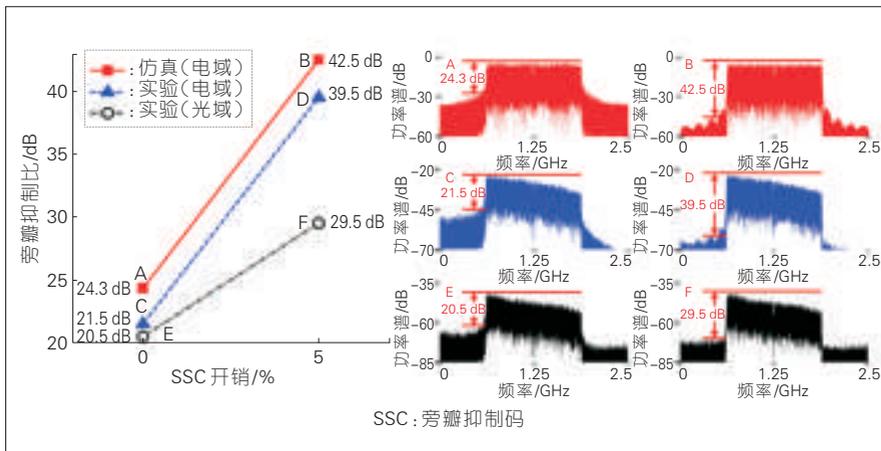
实验结果如图 6 所示, 设 DWDM-OFDM 系统中保护频带带宽为信号带

宽的 10%, 旁瓣抑制比定义为信号功率谱中的最大分量与保护频带之外最大分量的比值, 可以看出, 仿真结果和电域实验结果一致验证了加入 5% SSC 序列可以将 OFDM 信号的旁瓣抑制比提升约 40 dB, 与不加 SSC 的传统 OFDM 信号相比, 旁瓣抑制比提高了约 18 dB。

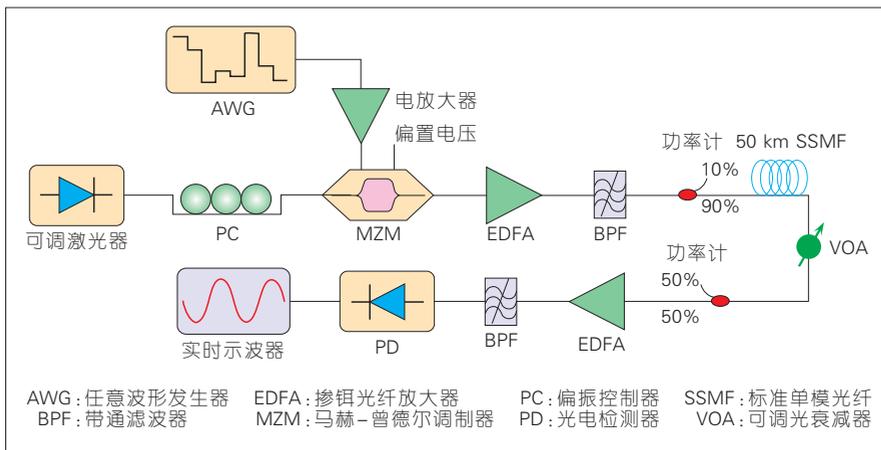
相比之下, SSC 在光域中体现出的性能不如电域, 旁瓣抑制比提升约 9 dB, 其原因可以总结为以下 3 点: (1) 光基底噪声以及 PD 拍频噪声较大; (2) MZM 的 V_{π} 限制了射频信号的幅度; (3) MZM 具有非线性, 产生了高阶分量。

2.2 尖峰消除 OFDM 实验验证

本文以实验验证了尖峰消除 OFDM 技术。实验装置如图 7 所示,



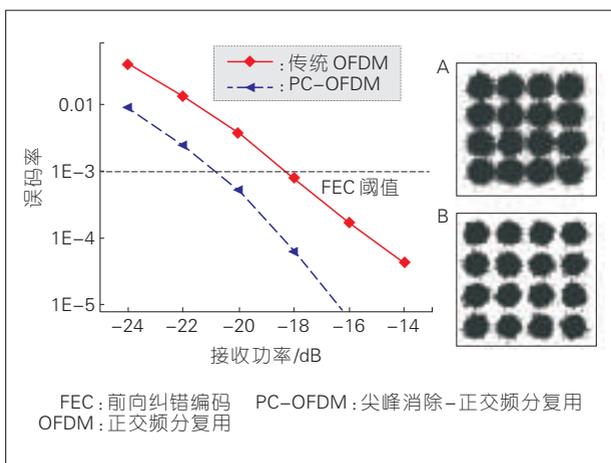
▲ 图6 实验结果



▲ 图7 实验装置

在发送端,分布反馈激光器(DFB)(SP TLS150D)产生一束波长为 1 551.01 nm 的光载波经过偏振控制器(PC)入射马赫-曾德尔调制器(MZM)(Fujitsu FTM7921ER),由任意

波形发生器(AWG)(Tektronix AWG7122C)产生的数据速率约为 8.62 Gb/s 的 OFDM/PC-OFDM 信号经过电放大器(EA)放大后驱动 MZM 调制光载波。OFDM 信号数据由 Matlab



▲ 图8
PC-OFDM 信号与传统 OFDM 信号的误码率曲线

产生,子载波数为 256,其中数据载波序号为 65~127,加载 16QAM 数据, FGB 载波序号为 1~64, OFDM 信号频谱结构满足厄米特对称,循环前缀长度为 16。PC-OFDM 信号由原始 OFDM 信号和尖峰消除信号叠加产生,产生尖峰消除信号的迭代次数为 20,预设最大幅度 A 设置为原始 OFDM 信号最大峰值的 70%。MZM 的输出经掺铒光纤放大器(EDFA)放大及带通滤波器(BPF)滤波后,通入一个 90:10 光耦合器,其中一端输出以功率计测量发射功率,另一端输出耦合至光纤进行传输。在接收端,光信号经过可调光衰减器(VOA)、EDFA、BPF 后进入 10 GHz PD,得到的电信号被 40 GSa/s 采样率的实时示波器(LeCroy 806Zi-A)采样,并用 Matlab 处理采样数据,计算误码性能。

图 8 为传输 50 km SSMF 后 PC-OFDM 信号与传统 OFDM 信号误码率曲线以及解调后的星座图,其发射功率为约 2.5 dBm。前向纠错的误码率阈值约为 10^{-3} ,而 PC-OFDM 信号在前向纠错阈值处的接收灵敏度约为 -18.1 dBm,比传统 OFDM 信号在该处的接收灵敏度高出约 2 dB。

3 结束语

本文提出两项 OFDM 传输性能优化技术,分别可以降低 OFDM 信号的旁瓣分量和 PAPR。通过在传统 OFDM 序列中加入 5% 软件定义的优化序列 SSC, OFDM 信号的旁瓣可以被多抑制约 18 dB。SSC 技术对应 DWDM-OFDM 系统中保护频带较窄的特点,将 SSC 技术应用于 DWDM-OFDM 系统,可以大大减小相邻载波间的干扰,提升系统性能。此外本文提出 PAPR 降低技术,即在 FGB 中插入一组软件定义的 PRT,可以实现约 2.5 dB 的 PAPR 降低,从而提升接收灵敏度约 2 dB。

参考文献

- [1] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications [J]. Journal of lightwave

- technology, 2009, 27(3): 189–204
- [2] STUBER G L, BARRY J R, MCLAUGHLIN S W, et al. Broadband MIMO-OFDM wireless communications [J]. Communications Letters, IEEE, 2004, 8(2): 271–294
- [3] SEO J, JANG S, YANG J, et al. Analysis of pilot-aided channel estimation with optimal leakage suppression for OFDM systems [J]. Communications Letters, IEEE, 2010, 14(9): 809–811
- [4] CHEN H, HE J, TANG J, et al. Performance of 16 QAM-OFDM With New Null Subcarrier Shifting in an Intensity-Modulated Direct Detection System [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6(2): 159–164
- [5] WEISS T A, JONDRAL F K. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency [J]. Communications Magazine, IEEE, 2004, 42(3): S8–14
- [6] BRANDES S, COSOVIC I, SCHNELL M. Reduction of out-of-band radiation in OFDM systems by insertion of cancellation carriers [J]. Communications Letters, IEEE, 2006, 10(6): 420–422
- [7] COSOVIC I, BRANDES S, SCHNELL M. Subcarrier weighting: a method for sidelobe suppression in OFDM systems [J]. Communications Letters, IEEE, 2006, 10(6): 444–446
- [8] MAHMOUD H A, ARSLAN H. Sidelobe suppression in OFDM-based spectrum sharing systems using adaptive symbol transition [J]. Communications Letters, IEEE, 2008, 12(2): 133–135
- [9] ZHANG X, LI Z, LI C, et al. Transmission of 100-Gb/s DDO-OFDM/OQAM over 320-km SSMF with a single photodiode [J]. Optics express, 2014, 22(10): 12079–12086
- [10] LOWERY A, ARMSTRONG J. Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems [J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2079–2084
- [11] JAVAUDIN J P, LACROIX D, ROUXEL A. Pilot-aided channel estimation for OFDM/OQAM [C]//Proceedings of the Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003–Spring. The 57th IEEE Semiannual. IEEE, 2003, 3: 1581–1585
- [12] CHUNG H S, CHANG S H, KIM K. Companding transform based SPM compensation in coherent optical OFDM transmission [J]. Optics express, 2011, 19(26): B702–B709
- [13] MILLER S H, HUBER J B. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences [J]. Electronics letters, 1997, 33(5): 368–369
- [14] TRUONG T A, ARZEL M, LIN H, et al. PAPR reduction using contiguous-tone tone reservation technique in optical OFDM IMDD transmissions [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2013: JTh2A. 67

←上接第5页

光/包交换混合网络的端到端业务建立延时。

参考文献

- [1] Index, Cisco Visual Networking. The zettabyte era [R]. San Jose, CA, May 30 (2012).
- [2] PAOLUCCI F, CUGINI F, GIORGETTI A, et al. A Survey on the path computation element (PCE) architecture [J]. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 2013, 15(4): 1–23
- [3] 华楠, 郑小平. 大容量光网络异构互联及管控研究 [J]. 中兴通讯技术, 2011, 17(6): 5–9
- [4] 鲁春, 郑小平, 华楠. 多域异构光网络互连互通管控机制 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 67(7): 982–990
- [5] SUBRAMANIA S. Implementing a network control plane [C]//Proceedings of the IEEE/OFA OFC/NFOEC 2011, NtUC1 (2011)
- [6] FERMAINT D J. Global network management system (GNMS) [C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference 1994: 660–663
- [7] OIF. OIF-E-NNI-Sig-02.0. OIF E-NNI signaling specification [S]. OIF, 2009
- [8] LU R, WANG L, LI Q, et al. Implementation of PCE-based management and control plane for heterogeneous optical networks [C]//Proceedings of the IEEE/OFA OFC/NFOEC 2011: NtUC2
- [9] SHANG S, HUA N, WANG L, et al. A hierarchical path computation element (PCE)-based k-random-paths routing algorithm in multi-domain WDM networks [J]. Optical Switching and Networking, 2011, 8(4): 235–241
- [10] ZHENG X. Key technologies of dynamic control in multi-domain heterogeneous optical networks [C]//Proceedings of the OSA Advanced Photonics, 2013: NW1C.4
- [11] HUA N, ZHENG X. Perspectives and challenges for future dynamic optical networks [C]//Proceedings of the IEEE ICOCN 2014:S41.2
- [12] LIU W, HUA N, ZHENG X, et al. Intelligent inter-domain connection provisioning for multi-domain multi-vendor optical networks [J]. IEEE/OFA Journal of Optical Communications and Networking (JOCN), 2015, 7(3): 176–192
- [13] ZHENG X, HUA N. Achieving inter-connection in multi-vendor multi-domain heterogeneous optical networks [C]//Proceedings of the IEEE/EICE OECC/ACOFT, 2014: TH12C.1
- [14] LIU W, CHEN X, HUA N, et al. A distributed stateful pce-based architecture for providing end-to-end connections in multi-domain multi-vendor optical networks [C]//Proceedings of the ECOC, 2014: P.6.14
- [15] PARULKAR G, TOFIGH T, LEENHEER M D. SDN control of packet-over-optical networks [C]//Proceedings of the IEEE/OFA OFC, 2015: W1G.4
- [16] GRINGERI S. Extending software defined network principles to include optical transport [J]. IEEE Commun. Mag., 2013, 51(3): 32–40
- [17] ZHENG X, HUA N. Achieving

作者简介



朱庆明, 上海交通大学电子信息与电气工程学院区域光纤通信网与新型光纤通信系统国家重点实验室在读博士研究生; 研究方向为光通信系统。



彭继宗, 上海交通大学电子信息与电气工程学院区域光纤通信网与新型光纤通信系统国家重点实验室在读硕士研究生; 研究方向为光通信系统。



苏翼凯, 上海交通大学电子信息与电气工程学院教授、博士生导师, 长江学者, 国家杰出青年科学基金获得者, IEEE 光子学会上海分会主席; 主要研究方向为微纳光学器件及其在信息传输及显示方面的应用; 已主持基金项目 20 余项, 获美国专利 6 项、中国发明专利 40 余项, 发表学术论文 200 余篇(其中 SCI 100 余篇)。

- heterogeneous packet-optical networks inter-connection with a software-defined unified control architecture [C]//Proceedings of the IEEE ICOCN, 2015: invited paper
- [18] HUA N, ZHENG X. Resource buffering schemes for dynamic traffic grooming in wavelength-routed WDM mesh networks [C]//Proceedings of the IEEE/OFA OFC/NFOEC, 2008: OThQ7

作者简介



郑小平, 清华大学电子工程系教授、博导; 长期致力全光通信网络与微波光子学的研究; 已主持基金项目 20 余项, 获国家发明专利 20 余项, 发表学术论文 200 余篇。



华楠, 清华大学电子工程系助理研究员、硕士生导师, IEEE、OSA 会员, IEEE JOCN、IEEE JSAC、OSA Optical Express、SPIE Optical Engineering、IET Communication 等杂志审稿人, OSA Advanced Photonics、IEEE/OFA/SPIE ACP 等国际学术会议 TPC 成员; 从事智能光网络管控及交换方面的研究; 已发表 SCI/EI 检索论文 80 余篇。

3S 网络:面向业务、安全增强的软件定义网络

3S Networking: Service-Oriented, Security-Enhanced and Software-Defined Networking

李赛飞/LI Saifei
邢焕来/XING Huanlai
闫连山/YAN Lianshan

(西南交通大学,四川成都 610031)
(Southwest Jiaotong University, Chengdu,
610031, China)

近年来,软件定义网络(SDN)技术迅速发展^[1-4]。与传统网络相比,SDN给网络设计和管理带来了极大的灵活性和开放性,促进了网络技术的创新和发展。传统网络中涉及很多类型和不同厂商的设备,运行各自封闭的操作系统,使用各不相同的配置命令,这使得网络的设计、维护和管理十分复杂,更改设备配置及升级软件耗时费力,容易出现错误甚至导致网络安全问题。此外,路由器、交换机等网络设备基于复杂的分布式控制协议,这些协议的研究和部署需要有多年的标准化推动及互联互通测试作为支持。在大型、真实的网络中验证新协议、新技术非常困难,严重抑制了网络领域的创新。

软件定义网络的核心思想是网络的控制平面和数据平面分离^[5],通过逻辑上集中的方式来控制数据平面的各种操作。研究者可根据自己

收稿日期:2015-05-05

网络出版时间:2015-06-22

基金项目:国家杰出青年基金项目(61325023);铁路总公司重大项目(2014X008-A);教育部重大项目(313049)

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1009-6868(2015)04-0011-04

摘要: 针对如何在软件定义网络(SDN)体系架构下设计管理灵活、复杂性可控的网络以及如何保障网络安全等问题,提出了一种面向业务、安全增强、软件定义(3S)的网络体系架构。基于3S架构,设计实现了一种针对中国铁路通信信号系统的统一安全管控方案,并借助3S特性及神经网络算法,设计实现了一种有效的分布式拒绝服务攻击(DDoS)检测方法。

关键词: 软件定义网络;网络安全;分布式拒绝服务攻击;中国列车运行控制系统

Abstract: We proposes a service-oriented, security-enhanced and software-defined (3S) network (SDN) architecture which is flexible. And in this architecture, the network complexity can be reduced and security has been enhanced. Based on the 3S architecture, we design a unified security management scheme to guarantee network security. To tackle distributed denial of service attack (DDoS) attacks, we designed a DDoS detection mechanism comprising attack trigger, attack detection, attack traceback, and attack mitigation.

Keywords: SDN; network security; distributed denial of service; Chinese train control system

的需要编写软件程序,从而灵活地控制网络运行,实践新的网络应用。虽然SDN技术的发展确实令人兴奋,但也应该意识到,SDN技术及思想提供给我们的是一个控制和管理网络的平台,一个创新的工具,它既未明确地指出网络如何控制,也未解决任何具体网络问题。因此,如何利用SDN这个有力的武器攻克网络中的难题,如何在SDN网络架构平台上,系统地组织和搭建灵活、高效网络成为SDN技术成功和发展的关键^[6]。

从网络系统安全的角度来看,网络及其管理越复杂,则安全性越脆弱。网络系统安全是一个动态的过程,而通常情况下一个网络系统随着组织的变化或发展,会变得越来越复

杂,越来越不可控,使攻击者有机可乘。对于网络安全攻防的双方,安全防护一直处于被动地位,由于“短板效应”,安全防护必须面面俱到,相反,一个严密防护的系统被攻破,可能仅仅是由于一个小小的疏忽。所以,如何设计一个安全的SDN网络架构是一个极具挑战性的难题^[7]。

1 3S 网络架构

SDN网络架构的安全性,是决定SDN技术发展和广泛部署的关键问题之一,包含两方面内容;一个是SDN本身的安全问题(例如:SDN控制器安全、应用部署安全等),另一个是如何充分发挥SDN优势,设计一个比传统网络架构更加安全的网络系

统。本文以“软件定义”思想为基础,提出面向业务、安全增强、软件定义(3S)的网络架构:

(1) 面向业务

网络系统应面向其所承载的业务,以网络系统业务和应用为中心,自顶向下驱动网络“流控”。传统网络中,网络与其所承载的业务耦合不紧密,网络管理员通常不直接管理网络中主机,对网络中所存在的业务并不十分了解。因此可能导致安全隐患。例如,在基于以太网的点到点协议(PPPoE)拨号认证上网的校园网环境中,攻击者同样架设一台PPPoE服务器,则可以劫持用户PPPoE拨号上网的认证信息,甚至可以发起PPPoE会话的中间人攻击。在传统网络中很难对这类攻击进行防护。在SDN网络架构下,对网络中主机所开放的业务进行注册和认证,非认证的服务将无法使用网络,这样可以使得网络更加清晰可控,增加网络的安全性。

(2) 安全增强

强调安全性为网络系统的一个基本属性。安全问题的本质是信任问题,传统网络安全通常将安全设备部署在内外网络的边界,重点是防止外部威胁,难以适应日益复杂的网络攻击。SDN的流控技术可以对网络的边界进行扩展,流控策略可以下发到每一个终端设备接入的交换机上,从设备接入网络的边缘处,根据策略严格控制进入网络的流量,而控制策略则是根据网络系统所承载的业务需求,把网络变成一个白盒。在网络汇聚和核心位置的网络设备则专注于流量转发。对于不符合业务或策略的流量还可以做到准确识别,及时发现异常,采取正确的措施。

当然,SDN网络技术不可能是所有问题的答案,网络系统安全包括诸多方面,例如网络系统中终端的安全。值得明确的是,我们所谓的“网络”究竟在网络系统安全中起到什么样的作用,SDN网络技术到底擅长解决哪一类问题?笔者认为,网络设备

的本质作用是“连通”,那么对于“网络”安全而言,则是对“连通”的控制,即网络“流控”。可以说基于OpenFlow^[9]的SDN技术很大程度上扩展了流控技术,使得流控可以在每个网络设备上(而且实现简单),不仅仅在防火墙等专用安全设备上。当然,基于SDN设备的“流控”也有其局限性,由于控制器的可扩展性和OpenFlow交换机处理性能等问题,它目前只适用于“无状态”的流控。对于有状态的流控则交由专门的安全设备,值得关注的是网络功能虚拟化技术^[9](NFV),从不同的角度出发,减小网络的复杂性和灵活性,可以与SDN技术配合,对于网络安全而言,SDN负责“无状态”的流控,NFV则完成复杂的网络安全功能。

(3) 软件定义

工欲善其事必先利其器。“软件定义”是一个强大工具,可以降低网络复杂性,增加网络的开放性和灵活性,降低网络管理和部署的成本,促进网络的创新,是未来网络发展的重要方向。软件定义的最大特点是网络可编程,众多网络设备通过逻辑上集中的程序进行控制,相对于传统网络管理员管理网络而言,软件程序可以应付大量复杂的网络事件,可以更方便的利用大数据分析等智能化手段,大大增强对网络的控制力度。

本文提出基于3S网络架构的两个应用场景:铁路通信信号系统网络安全统一管控,通过对铁路信号业务的详细分析,设计实现了面向铁路业务的软件定义铁路信号系统网络;另一个是分布式拒绝服务攻击(DDoS)攻击防御和检测,通过利用SDN技术,实现智能地检测DDoS攻击。

2 3S网络架构应用案例: 铁路信号系统网络统一 管控

2.1 软件定义铁路通信信号系统网络

中国高速铁路信号系统(如图1

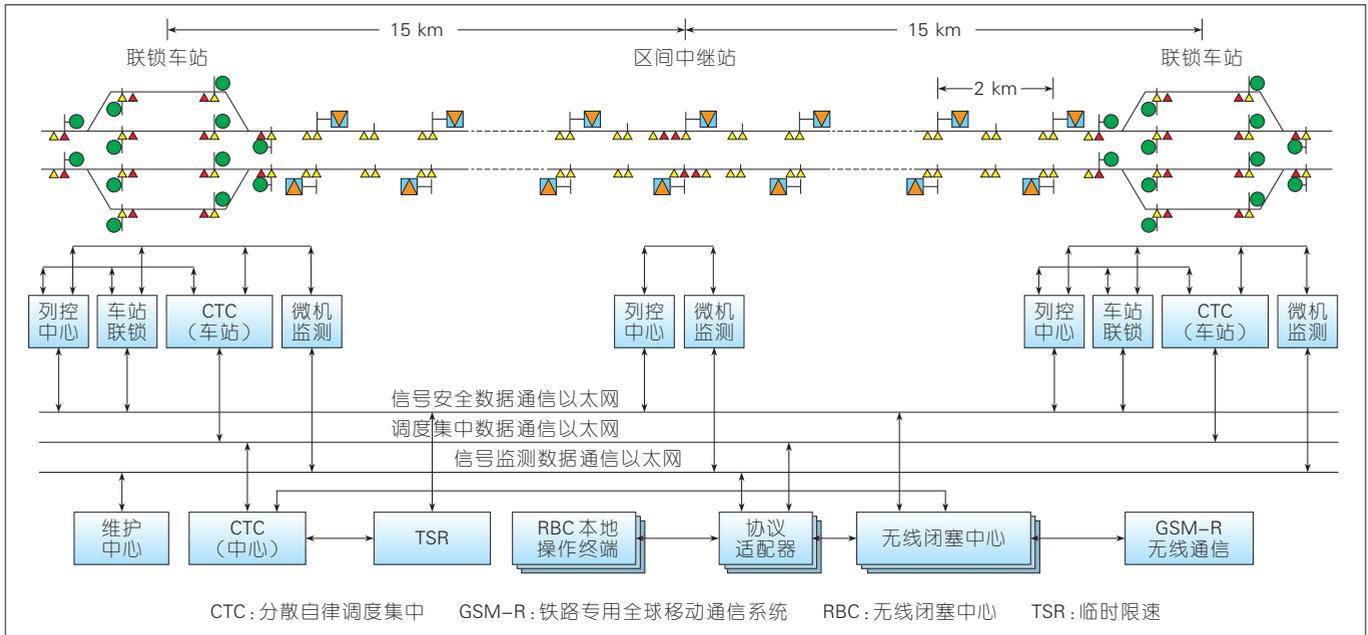
所示),包括列控系统、行车指挥系统、联锁系统和信号集中监测系统^[9]。列控系统主要由列控中心(TCC)、车载设备、应答器、无线闭塞中心(RBC)、临时限速服务器和传输网络组成;行车指挥系统由分散自律调度集中(CTC)中心、自律分机、传输网络、服务器系统、行调台、辅助台和电源系统组成;联锁系统由联锁设备、轨道电路、道岔转换、信号机和电源系统组成。信号集中监测通过标准接口与联锁系统、列车控制中心、TDCS/CTC、智能电源屏、ZPW-2000轨道电路系统、有源应答器等信号设备连接,监测设备状态。CTC分散自律调度集中通信网络^[10]、信号安全通信数据网^[11]和集中监测网络^[12]安全等级不同,独立成网,采用物理手段隔离,但逻辑上依然相连。

根据3S网络架构,设计面向铁路业务的软件定义铁路通信信号系统网络,系统架构如图2所示。自顶向下分别为业务应用层,把铁路信号系统的业务编译为网络可以执行的流控策略;铁路信号系统网络虚拟化层,把原来物理隔离的信号系统网络,用软件定义的方式进行隔离,在架构中表现为不同的虚拟网络;网络操作系统层,向上层网络提供网络系统功能函数,例如,信号系统网络的环网保护功能等。网络驱动层来驱动支持软件定义的网络的硬件设备。

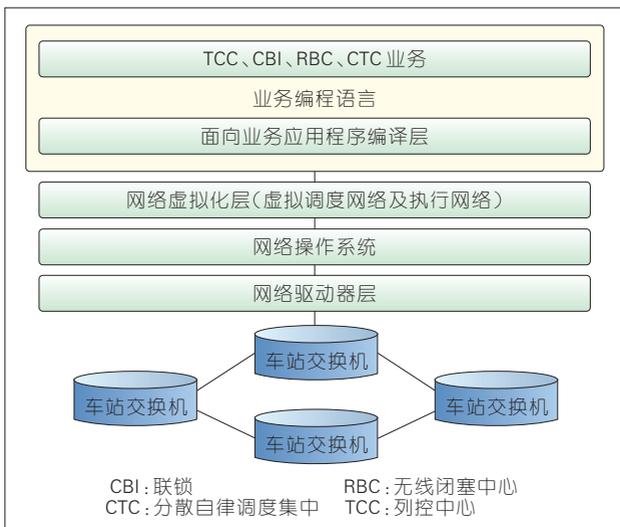
2.2 信号系统网络安全统一管控

铁路通信信号系统网络复杂,安全等级不同,接口众多,通过软件定义的方式对系统进行统一管控,降低管理的复杂度,提高网络的安全性。文章通过研究使用软件定义网络架构,重新设计铁路通信信号系统网络,把原来复杂的需要物理隔离的不同安全等级的网络,在统一的硬件平台上,通过软件定义的方式进行隔离和管控,从而降低网络管理的复杂性,提高网络的灵活性和安全性^[13-15]。

(1) 通信信号系统设备资产、服



▲图1 中国高速铁路信号系统典型组成架构



◀图2 面向铁路业务的软件定义铁路通信信号系统网络架构

业务、用户注册与认证

铁路通信信号系统跨地域地域广阔,网络结构复杂,设备众多,用户复杂,安全管理的难度较大。本文通过对应用业务平面的统一安全管控,在平台上对通信信号设备资产、服务与用户进行注册,实现对整个系统网络环境的认证。

(2)通信信号系统网络流控策略与访问控制

通过对铁路通信信号系统中资产、服务与用户的统一注册和认证管

理,为网络的流控和访问控制打下了基础,在此基础上可以实现精细的控制策略与白名单策略。把铁路通信信号系统中的业务流映射为网络流进行流控管理。同时,网络中可能存在数量较大的流,所以采用基于Openflow的多级流表进行设计。

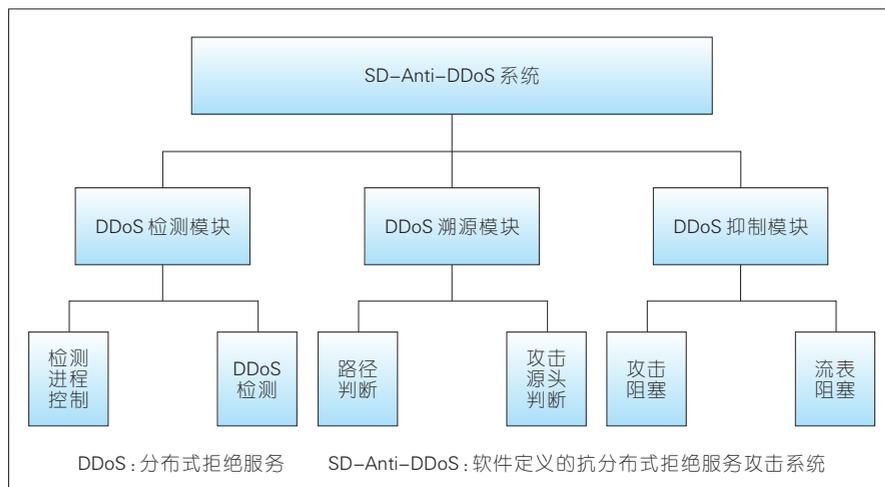
3 基于3S架构的智能DDoS攻击检测

DDoS由于其所具有的高危害、易于发起及排查困难等特性,一直是网

络面临的严重问题。同时,近年来DDoS呈现越来越快的增长趋势。2013年,针对国际反垃圾邮件组织SPAMHAUS的DDoS攻击对全球网络造成了严重危害。2014年,由著名黑客组织ANONYMOUS发起的针对索尼公司的DDoS攻击对其造成了巨大的经济损失。作为一种新兴的网络体系结构,SDN同样面临严峻的DDoS问题。因此,对SDN中的DDoS问题的研究对未来网络架构具有重大意义。

为解决SDN中面临的DDoS难题,本文提出了一种抗DDoS系统:软件定义的抗分布式拒绝服务攻击系统(SD-Anti-DDoS),如图3所示。SD-Anti-DDoS由3部分组成:DDoS检测模块、DDoS溯源模块及DDoS抑制模块。

DDoS检测模块实现在线实时检测DDoS功能,由检测进程控制及DDoS精细检测组成。检测进程控制模块用于控制检测模块的启动。当该模块判断应当发起检测时,DDoS检测启动。与传统检测方法相比,SD-Anti-DDoS中的DDoS检测为一种轻量级的检测方法。该方法通过BP



▲ 图3 软件定义网络 DDoS 攻击防御系统

神经网络判断交换机上面的流表是否由攻击流量产生,进而对网络中是否存在 DDoS 攻击进行判断。

当 DDoS 检测模块检测完成且发现网络中存在 DDoS 攻击时,DDoS 溯源模块随后启动并追溯攻击路径及攻击源头。DDoS 溯源模块主要包含攻击路径判断及攻击源头判断。攻击路径判断及攻击源头判断主要依据 SDN 控制器对底层网络拓扑的实时掌控,由攻击目的及攻击路径上各交换机的特性,结合已知的网络拓扑确定攻击路径及源头。

网络中的 DDoS 攻击路径及攻击源头确定后,由 DDoS 抑制模块负责对 DDoS 产生的危害进行抑制。首先,SD-Anti-DDoS 将在攻击源头阻塞攻击流量,防止 DDoS 攻击流量在网络中的传播。其次,SD-Anti-DDoS 将清除网络中因 DDoS 产生的无用流表,释放受影响的交换机上被占用的空间。

SD-Anti-DDoS 充分利用 SDN 的特性,基于 SDN 中的特点实现了 SDN 中的 DDoS 的实时检测、溯源及抑制,能够有效防御、抑制 SDN 中的 DDoS 造成的危害。

4 结束语

网络的部署是为了实现业务的连通,网络安全是为了保障网路中业

务的安全,因此,面向业务和安全应该是网络的两个基本属性,而软件定义可以使得我们更加容易的设计面向业务安全的网络,本文提出的 3S 网络正式结合这 3 个方面的理念,希望可以对 SDN 网络的设计提出有益的帮助。

致谢:

感谢西南交通大学信息科学与技术学院潘炜教授和郭进教授支持,博士生崔允贺、硕士生吴庆彪、马捷、李小琳、朱科融、徐寒等参与了研究工作。

参考文献

- [1] Software-Defined Networking: The New Norm for Networks. Open Network Foundation [EB/OL]. [2015-05-01]. <https://www.opennetworking.org>
- [2] Open Networking Foundation [EB/OL]. [2015-05-01]. <https://www.opennetworking.org/>
- [3] BOSSHART P, GIBB G., KIM H-S, VARGHESE G., MCKEOWN N, IZZARD M, MUJICA F, HOROWITZ M. Forwarding metamorphosis: fast programmable match-action processing in hardware for SDN [C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM. 2013: 99-110
- [4] GENI. Campus OpenFlow topology [EB/OL]. [2015-05-01]. <http://groups.geni.net/geni/wiki/OpenFlow/CampusTopology>
- [5] NICK M, TOM A, HARI B, GURU P, LARRY P, JENNIFER R, SCOTT S, JONATHAN T. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 99-115

- [6] NICK F, JENNIFER R, ELLEN Z. The Road to SDN [J]. Queue-Large-Scale Implementations Queue Homepage archive, 2013, 12(11): 138-142
- [7] SANDRA S H, GEMMA O, SAKIR S. SDN Security: A Survey [C]//Proceedings of the IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS), Italy, 2013
- [8] Network Functions Virtualisation (NFV). [EB/OL]. [2015-05-01]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>
- [9] 铁道部. 科技运[2008]34号. CTCS-3级列控系统总体技术方案 [S]. 2008
- [10] 铁道部. 科技运[2004]15号. 分散自律调度集中系统技术条件 [S]. 2004
- [11] 铁道部. 运基信号[2009]223号. 客运专线信号系统安全数据网技术方案V1.0 [S]. 2009
- [12] 铁道部. 运基信号[2010]709号. 铁路信号集中监测系统技术条件 [S]. 2010
- [13] 李赛飞, 闫连山, 郭伟等. 高速铁路信号系统网络安全分析与统一管控研究 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 12-18
- [14] LI S F, YAN L S. Enhanced Robustness of Control Network for Chinese Train Control System Level 3 (CTCS-3) Facilitated by Software Defined Networking [J]. International Journal of Rail Transportation, 2014, 2(4): 239-252
- [15] CASADO M, FREEDMAN M J, PETTIT J, LUO J, MCKEOWN N, SHENKER S. Ethane: taking control of the enterprise [C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM. 2007

作者简介



李赛飞,西南交通大学信息科学与技术学院在读博士研究生;研究方向为高速铁路信号系统网络安全、软件定义网络等。



邢焕来,西南交通大学信息科学与技术学院副教授;研究方向为软件定义网络、进化计算、多目标优化等;已发表学术论文10余篇。



闫连山,西南交通大学特聘教授、博导,信息光子与通信研究中心主任,教育部新世纪优秀人才,IEEE 高级会员,IEEE Photonics Journal 副编辑,20余种SCI杂志审稿专家,曾担任美国通用光电公司首席科学家;已发表学术论文200余篇,其中SCI收录100余篇。

SDN/NFV 技术的接入网应用

Applications in Access Network of SDN/NFV Technology

沈成彬/SHEN Chengbin
蒋铭/JIANG Ming
曾涛/ZENG Tao

(中国电信股份有限公司上海研究院,
上海 200122)
(Shanghai Research Institute of China
Telecom Co. Ltd., Shanghai 200122,
China)

经过多年的建设和优化,全球主流电信运营商宽带接入网的能力和运维效率都得到明显提升,但互联网产业的蓬勃发展和互联网业务形态创新驱动着网络架构的变革,推动了宽带接入网向智能化和能力开放两个维度上发展和演进。另一方面,我们也要看到,现有宽带接入宽带网还存在很多问题,还无法满足智能化和能力开放的需求。例如,现有的宽带接入网普遍存在着数字用户线(DSL)、无源光网络(PON)、Wi-Fi等多种技术和CO/DSLAM、FTTB/C/N/Dp、FTTH等多种建网模式并存如的高度异构的问题。这种高度异构性给运营商的网络架构、管理模型、运营支撑和业务经营创新等多个方面都带来了巨大的挑战。传统光接入网存在问题如图1所示。现有技术紧耦合的网络模型、固化的业务流程和封闭的运营支持系统(OSS)导致在宽带接入网中引入新技术、新建模式和新业务创新的周期长,在成本较高的同时也无法满足业务经营

收稿日期: 2015-05-18
网络出版时间: 2015-06-22
基金项目: 发改办高技[2012]1763号

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0015-005

摘要: 针对宽带接入网在网络建设、运行维护、用户体验和业务经营等领域面临的困难和挑战,以降低接入网的建设成本和维护成本,提升用户体验,促进业务创新为目标,研究了基于虚拟化、集中管控、能力开放等特征的下一代宽带接入网的系统架构、主要应用场景以及所涉及的关键技术。

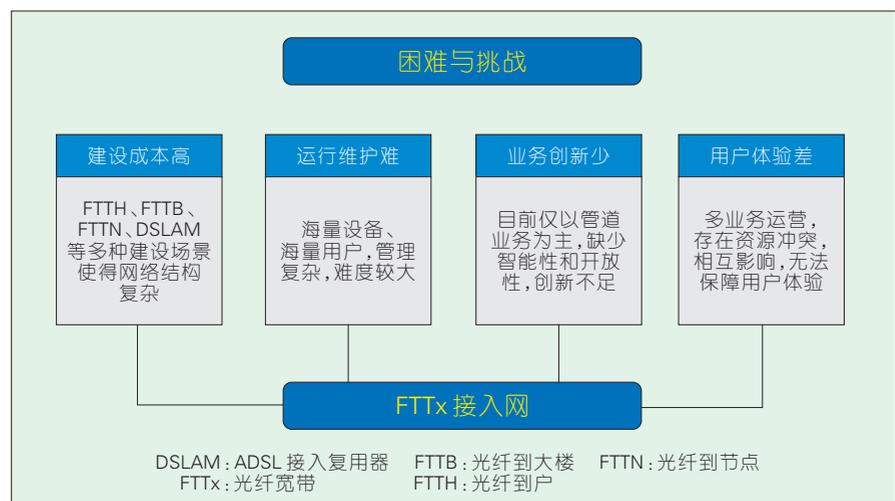
关键词: 软件定义网络;网络功能虚拟化;无源光网络;光接入网;能力开放

Abstract: There many challenges with broadband access networks in terms of construction, OAM, user experience, and business operation. We investigate the application of software-defined network (SDN) and NFV technologies in broadband access networks with the goal of reducing capex and opex and promoting user experience and business innovation. We investigate system architecture, use cases, and key technologies of next-generation access networks. The key features of such networks will be virtualization, centralized control, and openness.

Key words: SDN; network function virtualization; passive optical network; optical access network; openness capability

快速灵活发展的需求。同时在日常的运营支撑维护中,由于宽带接入网用户设备存在着海量、分散、环境复杂、形态多样等特征,导致运维成本

不断增高和效率低下。另外在宽带接入网中如何有效利用新技术,通过灵活、差异化、全局的资源规划配置来融合承载多业务,提升业务发放效



▲ 图1 传统光接入网存在问题

率和用户体验,也一直是运营商关注和研究的重点^[1-12]。

软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)这两种技术,正在逐步从理论研究阶段过渡到现网试验阶段,应用领域也从数据中心及互联网逐步扩展到公用电信网的各个组成部分,包含骨干网和城域网。其中,如何运用SDN/NFV技术发展和演进以FTTx为主的宽带接入网,业界也在不断探索之中。SDN/NFV可通过将宽带接入设备的控制平面和数据平面分离,使得控制平面和数据平面可以独立发展,从而实现网络资源的集中管控,以及网络功能的虚拟化从而提升网络智能,并且通过对外提供开放接口提高接入网的开放性、灵活性,提升宽带接入网的业务创新能力和差异化经营能力。

相对于骨干网的传输技术(如传输网、IP/MPLS网络)而言,宽带接入网直接面向最终客户,与运营商IT系统高度耦合,其智能性、灵活性、开放性对运营商的业务运营具有更加重要的价值和意义,所以在宽带接入网引入SDN和NFV技术,快速提升宽带接入网的智能性对于运营商实现互联网化转型具有更大的迫切性和现实意义。

1 SDN/NFV 接入网系统架构

1.1 软件定义接入网的定义

软件定义接入网(SDAN)是指采用SDN/NFV的基本理念和方法,实现接入网设备中的数据平面和控制平面分离,并结合虚拟化技术尽可能的采用标准化通用设备,提高接入网设备的统一性、通用性和适配性,降低网络异构程度;通过集中化实现对宽带接入网中的资源进行统一管理、控制和调度,通过应用编程接口(API)实现宽带接入网资源和能力的灵活配置和开放,降低业务部署的复杂度,推动业务创新以及网络的发展和

演进,从而实现面向应用和客户的智能化宽带接入网。软件定义接入网包含3个核心特征:

(1)资源和功能虚拟化

对宽带接入网各设备节点中资源和功能的逻辑抽象,分离控制功能和转发功能,并利用虚拟化技术尽可能软硬件解耦,从而实现宽带接入网资源的灵活配置、调度和网络功能按需部署。NFV的虚拟化技术应用在于宽带接入设备中时,对于设备的型号、设计架构和实现会产生一定影响。但在异构程度很高的宽带接入网中,基于通信技术类型、部署环境、设备型号呈现出的多样性和复杂性,在未来一段时间内,宽带接入网预计仍将以采用专用设备为主的模式,而不意味着使用通用x86服务器来全部取代。

(2)集中管控

通过对海量接入设备的集中管理和控制,提供宽带接入网资源统一调度和网络功能的集中管理,实现业务能力抽象和业务自动编排,并支持与IP城域网、传送网和运营管理系统等外部网络的跨域、跨层的端到端协同,从而提升网络运维效率。

(3)能力开放

通过不同层次对外开放的API接口,支持网络功能可编程,并将抽象后的网络能力开放给应用和内外部客户,促进宽带接入网的业务创新,从而实现管道增值。例如,基础网络运营商可以通过能力开放实现接入带宽批发业务,也可以为增值业务服务提供商提供带宽、QoS、定位等多种能力的调用,从而促进业务创新。

1.2 软件定义接入网的网络架构和功能

软件定义接入网是公用电信网利用SDN/NFV技术向前演进的过程中不可缺少的重要组成部分,其在整个SDN/NFV电信网中的位置如图2所示。

软件定义接入网的具体网络架

构和功能组成如图3所示,包括协同层、控制层和数据平面3个层次。

数据平面由宽带接入网各节点设备如光线路终端(OLT)、多住户单元(MDU)、单个家庭用户单元(SFU)、家庭网关单元(HGU)、光配线网络(ODN)等网元设备和相关基础设施组成,完成网络中报文的传送、调度、感知、监测,实现接入线路媒体访问控制(MAC)层功能、二层以太转发功能以及本地维护控制功能。数据平面中的各节点设备具备较强的可编程能力,以支持网络资源的灵活部署和网络功能的可扩展。数据平面在支持控制与转发分离的前提下,同时要保证控制器软件的升级不影响数据平面已有的业务转发。另外控制和转发分离并不一定指在接入网数据平面的设备中完全剥离控制功能。接入技术的底层控制协议功能,以及设备中需要实时处理或者大流量处理的控制协议,目前仍建议在数据平面完成。未来随着SDN/NFV技术的不断发展和设备形态的演进,可以考虑这部分功能的适当迁移。

控制层主要提供网络资源、功能的抽象、虚拟化和集中管控的能力。对于控制层而言,应管控宽带接入网络的整体资源和拓扑构造,而不局限于单个网元信息。控制层通过南向接口去控制数据平面的接入网络设备和设施,并且基于宽带接入设备呈现出的多样性和异构性,南向接口上应具备兼容多厂家、多协议的能力,并能灵活扩展支持不断发展的接入技术、不断演进的设备形态和建设模式。通过北向接口控制层为协同层甚至应用层提供网络拓扑、状态和虚拟资源管理等基本的网络服务,因此应支持抽象网络的资源和功能,并通过标准化的接口向上开放,使上层应用在不感知物理网络的前提下能方便快速地调用网络资源和能力,并快速引入新业务。

协同层主要提供业务能力抽象

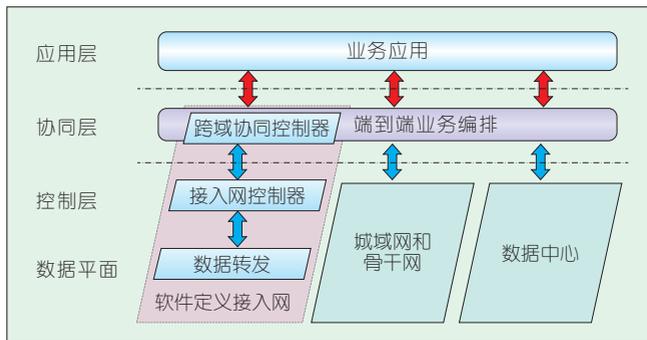


图2
包含接入网的
SDN总体架构

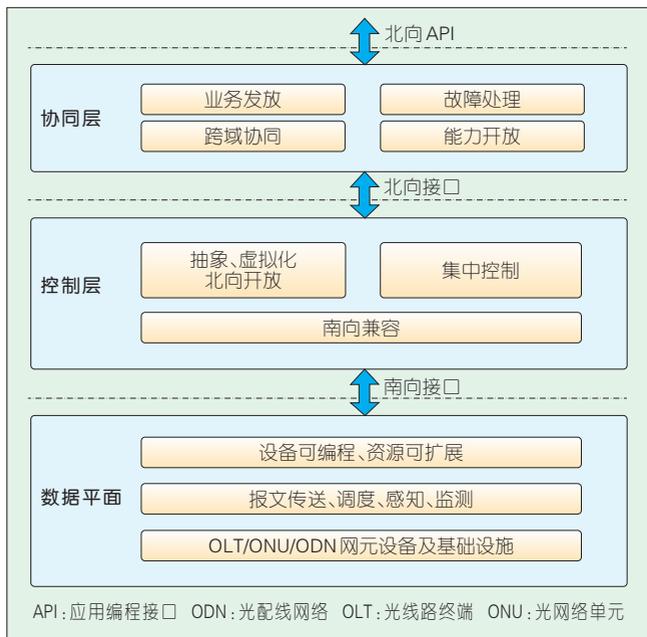


图3
软件定义接入网架构

及跨域协同,具体功能包含业务发放的自动化、业务保障的自动化,业务可视化和端到端的资源管理及跨域跨层协同,实现按需的业务自动编排和维护。并通过开放API支持网络能力开放以及快速的应用创新。

2 软件定义接入网的标准化进展

2.1 软件定义接入网的需求和网络架构标准化进展

针对宽带接入网的SDN/NFV技术应用和演进,全球多个标准组织都在进行积极的探索和研究。宽带论坛(BBF)在2012的会议中,首次提出了基于软件定义的接入网未来架构,并确定为其未来重点研究方向

之一。随后BBF于2013年开始启动了多项SDN/NFV应用于宽带接入网的研究课题,以推动相关技术的发展。例如,在BBFWT-317 Network Enhanced Residential Gateway中重点研究了家庭网关虚拟化,通过将家庭网关的3层以及应用层的功能上移到OLT甚至宽带远程接入服务器(BRAS)上,从而简化业务发放,降低维护成本(OPEX)。BBF WT-328 Virtual Business Gateway则研究企业网关虚拟化技术。BBF SD-313 High Level Requirements and Framework for SDN in Telecommunication Broadband Networks则研究宽带网络的SDN的总体框架和需求,其中也包含了软件定义接入网的应用场景和系统架构。BBF SD-340 Stage 1 for introduction of

NFV in MSBN则分析NFV在固定宽带接入网络中的应用场景。BBF WT-345 Migrating to NFV in the context of WT-178研究了基于WT-178技术的数据面NFV演进。2015年初,BBF新立项了WT-351 Fiber Access Network Sharing项目,主要目标是研究基于虚拟化的接入网基础设施共享技术。

在国际电信联盟(ITU-T)中,首先在ITU-T SG11全面启动了SDN的标准研究,启动新的标准项目,研究宽带接入网引入SDN时的需求、架构、以及相关接口的定义,并开展宽带接入服务器设备上实现SDN的研究,以及宽带接入网(SBAN)应用场景和信令需求(Q.SBAN)的标准制订工作。

中国通信标准化协会(CCSA)也由传送与接入技术委员会(TC6)于2014年启动开展《基于SDN的宽带接入网的应用场景及需求》行标、《基于SDN的宽带接入网接口协议研究》研究课题、《基于公用电信网的宽带客户网关虚拟化》等一系列的相关研究和标准化工作。

2.2 软件定义接入网的接口标准化进展

SDN网络技术研究中,控制层和转发平面之间的接口标准化工作极其重要。在这个领域,ONF主导了技术标准制订权,在2009年发布了第一版的Openflow协议,并于2015年04月更新到1.5.1版本。ONF在标准化研究过程中,基于不同网络向SDN演进中的差异化特征和需求,从Openflow协议1.3.5版本开始支持非TCP传送通道的承载。对于软件定义接入网来说,采用标准化的Openflow协议作为南向接口加以针对性的扩展,并利用PON技术本身所提供的维护管理通道在OLT和ONU之间传送,是业界比较认同的技术选择。国际标准组织ITU-T SG15组也已经开展Openflow Over OMCI的技术研究,并将其纳入到ITU-T G.988

OMCI 的标准化工作。

3 软件定义接入网的应用场景

基于宽带接入网在发展中的难点,结合 SDN/NFV 技术,软件定义接入网可以在下列几种应用场景中尝试进行转发和控制分离,业务编排统一调度,以形成完整解决方案。

3.1 接入设备虚拟化,远端节点聚合管理

随着用户带宽的不断提速,接入设备距离用户也越来越近,远端接入设备数量不断增长,再加上用户接入地点和接入介质的复杂多变以及接入设备厂家的多样化,让运营商在网络规划部署和运营维护网络中的海量接入节点和形态各异设备型态时不仅需要多部门之间的协调沟通导致耗费时间,而且基于现有的人工逐网点配置模式在业务发放时会形成巨大的工作量并导致出错率高和效率低下。

设备虚拟化情况下远端节点聚合管理应用场景如图 4 所示。利用 SDN 及 NFV 的技术,将不同 FTTx 场景下的远端节点 MDU、SFU 和 HGU 等设备虚拟化,部分控制功能上移,在 OLT 上则屏蔽差异化的不同远端节点设备,通过网管或协同层的调度来支持上层和 OLT 的直接对接,实现聚合管理和整体规划;通过控制面中接入控制器的抽象、虚拟等关键技术功能实现业务自动发放、业务升级以及性能数据的采集代理功能,支持运维自动化;支持自动发现拓扑结构以及远端接入设备节点的即插即用。

3.2 物理网络虚拟化,资源虚拟化并灵活开放

随着互联网的发展,并应对带宽价值不断持续下降的现状,电信运营商希望能针对零售服务供应商 (RSP) 价值客户出售差异化的网络资源和业务,弥补收支差和鼓励业务

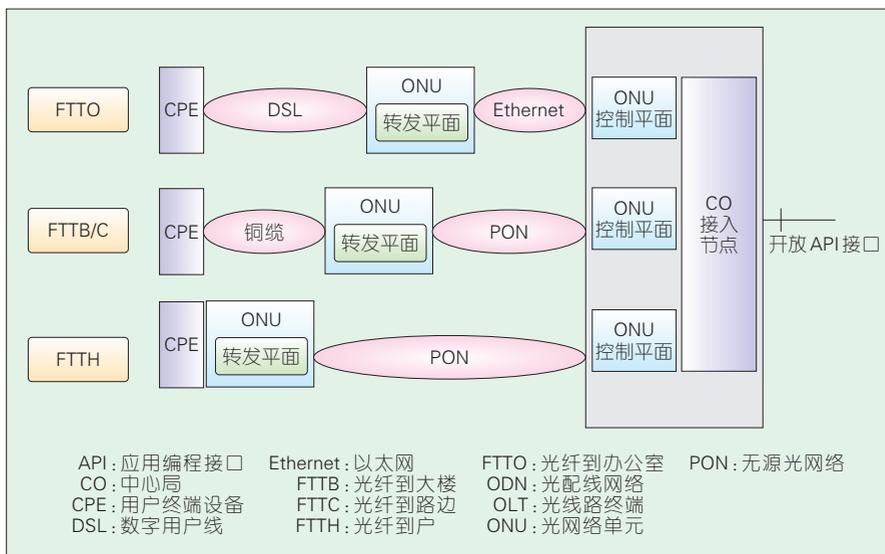
创新。但电信运营商目前经营模式以带宽出租为主,收入模式单一。RSP 无法有效自主业务运营和创新,其新业务上线依然要依赖于电信运营商的配合,业务需求从申请到生效的周期比较长,并且只能获得提供简单差异化的带宽,而无法获得进一步差异化的网络服务,尤其不利于其业务发展。

物理网络虚拟化情况下资源虚拟化并灵活开放应用场景如图 5 所示。基于 SDN/NFV 技术,基础物理网

络在逻辑上构造多个资源和功能虚拟化的虚拟逻辑网络。不同租户可以独享虚拟逻辑网络,利用电信运营商提供的开放 API,自主快速的进行业务创新,并按需配置资源。同时电信运营商可以保障不同逻辑虚拟网络之间的资源相互隔离,从而实现不用租户间的业务运营安全。

3.3 业务隔离,提升用户感知

电信运营商的网络环境中,多种业务共存,如移动业务、专线业务和



▲ 图 4 远端节点聚合管理应用场景

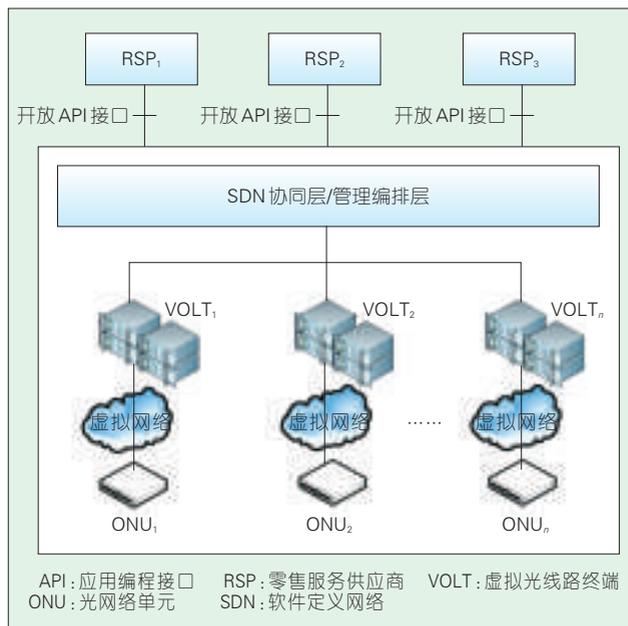


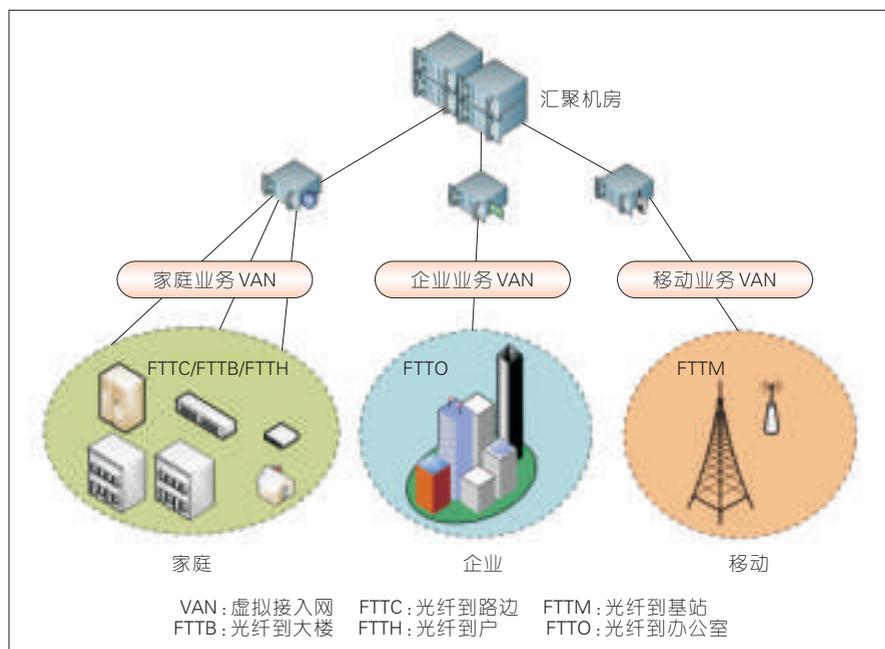
图 5 资源虚拟化并灵活开放应用场景

家客业务等。在业务规划、配置和运行过程中,往往会相互干扰影响,引发资源的冲突和协调,致使用户感知差、业务运维复杂且效率低。

业务隔离情况下提升用户感知应用场景如图6所示。可以利用SDN/NFV技术,根据不同的用户和业务构建不同的虚拟网络(比如将单一的物理设备逻辑划分为多个承载不同业务的虚拟设备,每种业务对应一个虚拟接入网),管理权限按域划分,资源按需分配,从而实现在多业务场景下业务间相互独立、相互隔离、互不影响的目标,提升用户的业务体验,简化网络部署,降低运维成本。比如小基站回传部署中,可以利用SDN/NFV的虚拟化和集中控制技术,实现端到端的动态资源配置调整,保障业务QoS。

4 软件定义接入网应用的关键技术

目前,SDN/NFV技术在接入网应用还处于发展的初期,还有很多关键技术问题需要解决。根据上述技术架构和应用场景的分析,可以看出其主要包括如下几个关键技术:



▲ 图6 提升用户感知应用场景

(1)系统模型的建立和细化。系统模型研究主要是在宽带接入网融入整体SDN/NFV战略的前提下,通过对接入网络中各个设备的功能和资源按照不同层次和粒度进行细分抽象,并建立各功能和资源抽象之间的关系模型,从而实现基础网络与上层业务之间的协同(即业务编排功能)。该关系模型需要能适应当前的业务需求,并可灵活扩展以支持未来的业务发展。该关系模型也需要能同步协调支持城域网、运维支撑网络等相邻网络的发展演进。最后该关系模型必须是一种能支持多种技术、多个厂商,并可以适应多样化部署场景的开放、适应未来并后向兼容的模型。

(2)演进路线。SDN/NFV在宽带接入网的引入是一个逐步演进和发展的过程。由于接入网是电信网络资产占比最大的部分,这个演进过程应该基于现有的接入网和OSS系统的现实,确保网络的平滑演进和具有可实施性。这个演进的路线需要重点关注设备层功能模型的渐进重构和OSS系统与集中控制器在功能上的重新分配。

(3)设备硬件架构设计。接入网引入虚拟化后和集中控制机制后,接入网的硬件架构甚至核心芯片、光模块的功能都需要重新设计。比如,现有的“强线卡、弱主控”的硬件设计就无法满足OLT功能虚拟化的需要,需要加强主控板卡的CPU的运算能力、流量管理能力,甚至需要较强的存储能力,形成“强主控、弱线卡”的新型架构。另外,强化的流量管理功能需要OLT甚至MDU的主交换板都要支持基于流表的转发控制,这需要采用新型的交换芯片。为了满足一些场景对物理层虚拟化和自适应的需求,需要光模块具有发射波长和功率可调的特性。

(4)控制器的设计与实现。软件定义接入网的应用场景和业务需求远比传输网、IP网络复杂,其控制器的设计要基于演进过程中不同阶段的功能要求和抽象出来的功能、资源以及建立的关系模型,确定数据转发平面、控制层和协同层的功能划分、资源处理、虚拟化程度,以及相应的设备平台类型和系统架构设计等。例如,对抽象后网络功能和资源进行逻辑分片或虚拟出多实例。另外,对于控制器和协同层的功能划分,需要在考虑到宽带接入网固有特点的前提下结合不同阶段网络技术及业务需求的实际情况来研究分析,同时尤其要考虑和其他网络之间的跨域跨层对应关系。例如,对于高度异构的接入网的终端虚拟化,可由控制器屏蔽一些接入技术和设备形态上的差异,提供归一化的业务属性和接口。

(5)南北向接口的标准化。就是依据上述提到的系统架构、设备平台和关系模型,进行不同层次的软硬件配置、各功能模块之间以及和不同网络领域之间的协议及接口标准化。

5 结束语

SDN/NFV利用虚拟化、集中管控、能力开放等特征和技术,划分出

► 下转第29页

软件定义光网络光码分多址编解码技术发展趋势

OCDMA Endecoding Technology Trends for Software-Defined Optical Networks

蒲涛/PU Tao

孟凡秋/MENG Fanqiu

赵继勇/ZHAO Jiyong

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007)

(School of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0020-005

摘要: 认为光码分多址技术的发展趋势应当是高频谱效率动态可重构的, 以适应软定义光网络(SDON)对端到端长距离跨节点的安全光通道应用服务需求。针对现有基于全光信号处理的光码分多址(OCDMA)技术存在频谱效率低、色散补偿困难和多址干扰严重3大问题, 分析了全球研究现状, 预测OCDMA技术发展趋势应采用电编码和数字相干接收机。提出了光编解码技术应用于SDON所面临的关键问题, 并给出了解决这些关键技术问题的技术路线。

关键词: 光码分多址; 软定义光网络; 数字相干接收机

Abstract: In order to fit the application needs of secure, long-haul optical channel across relay nodes in soft defined optical networks (SDON), the next-generation optical code division multiple access (OCDMA) system should pursue the goal of high frequency efficiency and dynamic reconfiguration. Recent researching reports are reviewed to reveal the main problems of traditional OCDMA with all optical signal process, which are low frequency efficiency, dispersion and multiple access interference. It is predicted that electronic domain encoding/decoding and digital coherent receiver will be the trends of OCDMA technology. The pivotal problem and solution path are provided for the application of the next-generation OCDMA in SDON network.

Keywords: optical code division multiple access; software-defined optical networks; digital coherent receiver

作为一种基本的通信复用方式, 码分多址(CDMA)技术具有软容量、支持多业务和内在安全性的特点, 它同数字信号处理技术相结合在第3代移动通信中得到广泛的应用, 3G标准无论是北美的CDMA2000、欧洲的宽带码分多址(WCDMA)还是中国的时分同步码分多址(TD-SCDMA)标准都以CDMA作为主要的多址/复用方式。作为一种抗干扰与抗截获通信手段, CDMA在军事卫星通信和野战地域网中得到应用。光纤通信具有长距离大容量的优势, 20世纪90年代以来, 凭借波分复用(WDM)和掺铒光纤放大器(EDFA)技术, 数百个波长信道的大容量光传送网(OTN)为以互联网为主要业务的信息网络提供底层传送服务。借助数字信号处理与相干接收技术, 目前已经能够实现了单波长100 Gb/s和单根光纤100 Tb/s信号的数千公里

传输。

光码分多址(OCDMA)系统中总用户数(码字容量)可以远大于实时通信的用户数(通信容量), 通信用户可以按需占用信道资源而不受通信容量的限制, 这种弹性容量(软容量)的特点使得OCDMA比固定资源分配的波分多址(WDM)和时分多址(TDMA)方式更适应动态的光层组网需求。

随着2013年9月“棱镜门”事件爆发, 越来越多的证据表明原本被认为安全的光缆通信也存在被窃听的

安全隐患。其实从2003年起, 美国就在美国国防高级研究计划(DARPA)项目的支持下开展了OCDMA抗截获通信的研究, 推动了OCDMA全光编解码器技术的发展, 后又发展为可以把保密信道隐藏在公共信道中的光隐藏通信技术。这是因为OCDMA编解码技术可以将数字信号转换为高速、宽频谱、类噪声信号, 从而成为一种物理光层抗截获通信方式。

软件定义网络(SDN)是面向未来的新一代网络创新架构, 通过将网

收稿日期: 2015-04-30

网络出版时间: 2015-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(61177065、61475193); 国家重点基础研究发展(“973”)规划(2012CB315603);

络设备控制面与数据面分离,从而实现网络流量的灵活控制,为核心网络及应用的创新提供良好的平台。SDN的引入扩大了光网络智能管控的功能和范畴,并带来了丰富的应用层,成为目前的发展趋势。

虚拟化的增值业务应用是基于软定义光网络(SDON)的一种重要应用,目前包括多租户的光虚拟专网(OVPN)、动态带宽按需分配(BOD)、差异化服务等级(SLA)等。随着网络安全事件的频繁曝光,用户对光网络通道安全抗截获性能的日益重视,端到端长距离跨节点的安全光通道服务必将成为SDON网络的一种新型应用。

1 全球研究现状分析

1.1 全光编解码技术的OCDMA研究现状

随着光纤布拉格光栅(FBG)、平面光波电路(PLC)和空间液晶调制器(SLCM)等全光信号处理技术的发展,基于全光信号处理技术的OCDMA研究迅速发展,能够实现吉比特多用户传输的有二维编码、时域相位编码和频谱相位编码等3种全光编码方案:

实现较多用户数通信的实验记录是加拿大Laval大学在OFC2001会议上报道的^[1],实现了16个速率为1.25 Gb/s的用户传输80 km的系统,它采用了30个间隔50 GHz的波长通道,光纤光栅阵列(FBGA)中子光栅长度14 mm、子光栅间隔1 mm,编解码器总长119 mm,对应于150 ps的编码周期,限制了系统用户速率的进一步提高。

时域相位编解码是一种重要的编码方案,可以采用超结构光纤光栅(SSFBG)和PLC技术实现。研究SSFBG实现超长码片数时域相位编解码的主要有英国和日本。英国南安普顿大学首先发表了采用SSFBG、码长为255的实验报道^[2]。日本的国

家信息通信技术研究(NICT)、大阪(Osaka)大学和OKI公司创造了码长为511,码片速率640 Gchip/s的编解码器世界纪录^[3]。2004年,意大利Rome Tre大学提出波导光栅路由器(AWG)可以用于设计产生高相关性能的正交光码^[4]。

除了上述两种方案之外,频谱相位编解码也是代表OCDMA技术最新进展的重要技术方案。美国在频域相位编码技术方面处于领先地位,南加州大学最早于1985年提出利用对超短脉冲的频谱进行相位编码^[5],采用体光栅、透镜系统和掩模板构成4倍焦距(4-f)空间光学系统实现光谱相位编码。

加州大学Davis分校在DARPA O-CDMA微系统项目的支持下进行一系列的频谱相位编码研究工作。UCDavis同时采用液晶-空间光相位调制器(LC-SLPM)这两种不同的器件分别进行频谱相位编解码实验。在OFC上报道了采用LC-SLPM实现32个10 Gb/s用户速率的传输实验^[6]。

上述基于SSFBG、SLM、AWG等全光编解码器的实验系统研究报道中,编码方式虽然从非相干的幅度编码发展为相位/相干编码方式,但是存在如下问题:

(1)采用4~20 nm的宽谱光源,无法与基于密集波分复用(DWDM)波长颗粒的软件定义光传送网络(SDON)相兼容。

(2)均使用直接检测方式的接收机,多址干扰和差拍噪声严重影响多用户性能,必须采用光阈值、时间门等复杂全光处理手段。

(3)由于占有频谱较宽,需要针对不同链路长度配置特定的色散补偿模块。

1.2 采用电域编解码和相干接收技术的OCDMA研究进展

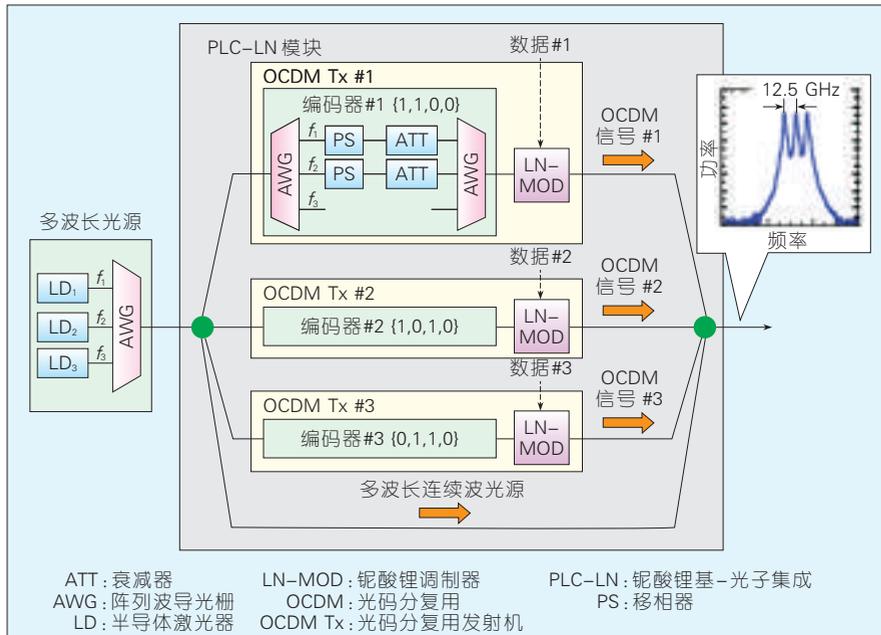
采用数字相干接收技术是OCDMA走向软件定义光网络的關鍵。针对全光信号处理OCDMA编

码系统存在频谱利用率低、多址干扰严重的问题,国际上已有研究机构开展电域编解码和采用数字相干接收的OCDMA技术研究。

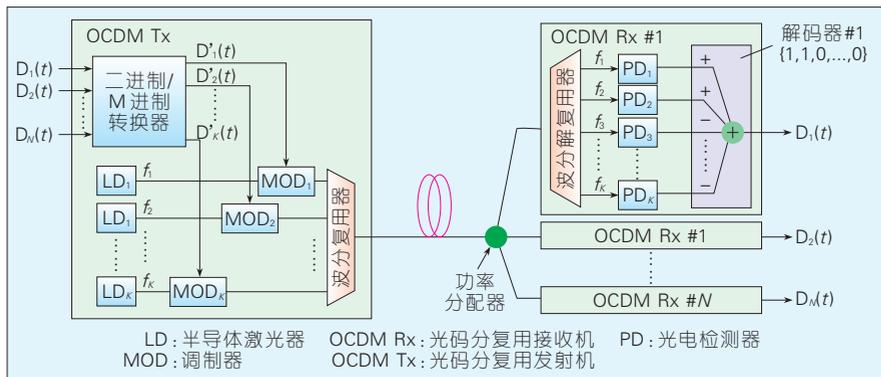
日本NTT接入网业务系统实验室(ANSSL)针对下一代宽带接入网技术与标准,研究非全光信号处理方式的OCDMA系统方案。在2008年ECOC会议上^[7],他们提出相位匹配编码的光码分复用(OCDM)与传输,接收机采用多频自零差检测方案,研制了平面光波电路-铌酸锂(PLC-LN)模块用以实现OCDM编码和数据调制,并进行了如图1所示的验证性实验,用户数据速率可以达到1.5 Gb/s。

2008年为了减缓差拍噪声,他们理论研究了采用外差检测接收频谱幅度编码OCDMA系统性能,并且通过实验验证了相干接收对差拍噪声的抵消作用^[8]。在2009年OFC会议上,他们又提出采用高速数字电路和激光器/调制器阵列的OCDM编码方案,该方案属于频谱多级幅移键控(M-ASK)编码方案,进行了3个用户接收功率1.5 Gb/s速率的码分复用传输验证实验,-17 dBm时误码率达到 10^{-9} (Q值15.6 dB),表明有效抑制了多址干扰(MAI)和差拍噪声^[9]。实验方案如图2所示。在OFC2009工作基础上,NTT在ECOC2010会议上提出了采用多电平幅移键控与二进制相移键控相级联的M-ASKxBPSK调制方式,保留了自零拍接收方式,实验验证了如图3所示3用户1.5 Gb/s OCDM系统传输^[10]。

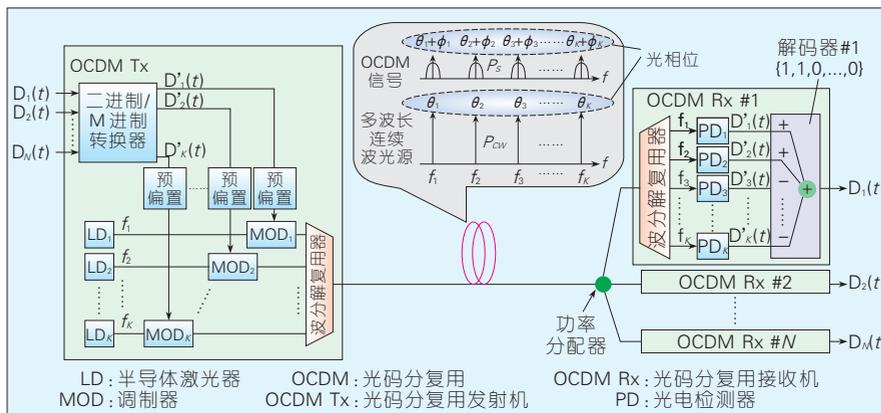
2007年,约翰霍普金斯大学提出采用相位偏振分集(PPD)的方法^[11],理论仿真验证了这种方法在比特同步条件下可以使得MAI最小化,该方案的频谱效率高达1 bps/Hz。2012年,他们提出采用2组光谱线外差接收的编码方法^[12],一组编码光频梳同另一组参考光频梳同时传输,它们的频率间隔正好是比特速率。通过相干接收处理可以抵消差拍噪声与多址干扰,无需锁相环(PLL)和光阈值



▲图1 日本NTT的OCDM方案



▲图2 日本NTT的M-ASK OCDM方案



▲图3 日本NTT的M-ASKx BPSK OCDM方案

器件;还指出运用傅立叶综合技术可以有效色散管理。2013年,该课题组

报道了如图4所示的实验系统^[13],验证了4用户4.5 Gb/s速率的系统,误

码率为 10^{-7} 时,信号与MAI的最佳对比度达到648。

清华大学2006年研制出基于等效相移(EPs)方法的SSFB时域相位编解码器^[14];华中科技大学基于7码片SSFB相位编解码器进行了40 Gb/s的传输试验^[15];解放军理工大学提出了灵活控制编码带宽的子采样技术^[16-17],并基于低成本增益开关光源,实现了2.5 GHz双用户100 km无误码传输^[18]。在中国国家“863”项目支持下,解放军理工大学和南京大学进行了10 Gb/s速率多用户的OCDMA系统的相关实验^[19],对高频谱利用率的时频域编解码器进行了一系列的实验探索^[20-21]。

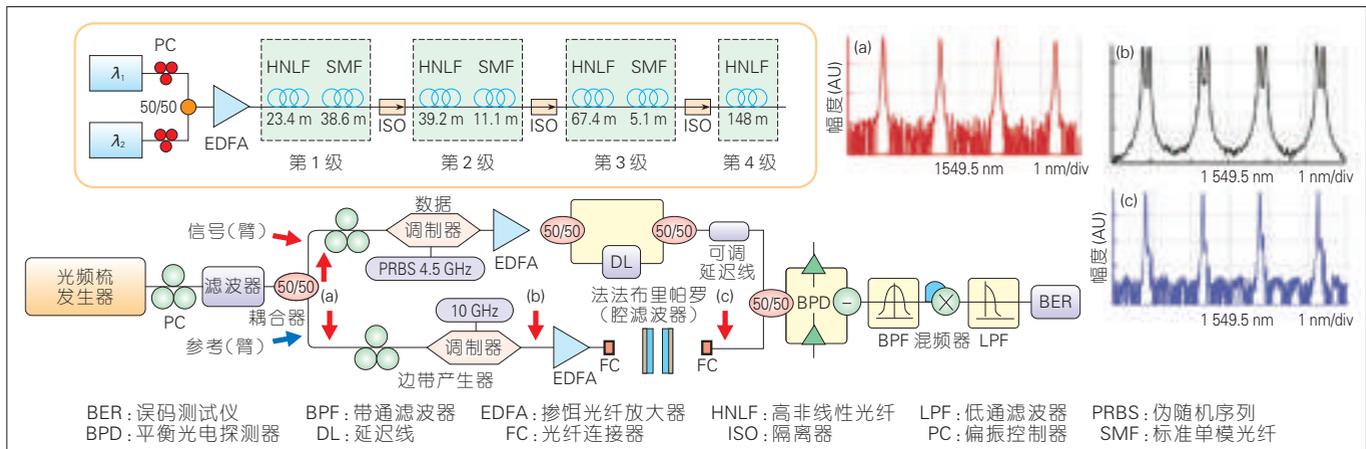
2 软定义光网络下OCDMA技术发展预测

由上述研究现状分析可知,基于全光信号处理的OCDMA系统研究已进入技术“瓶颈”,存在多址干扰与噪声严重、需要精确色散补偿、频谱利用率低的问题。采用数字相干光接收技术的光码分多址技术研究才刚刚起步,相对于全光信号处理方式尚未实现速率和用户数的提升,只有国际上个别的研究机构进行此类实验研究。

OCDMA与相干光接收和数字信号处理技术相结合是未来发展趋势,基于传统DWDM、OFDM等固定资源分配的全光接入技术已经达到很高的频谱利用率(1~8 bps/Hz),可以和灵活颗粒(Flexible grid)的WDM骨干网无缝衔接。

作为具有内在软容量和动态接入能力的OCDMA技术目前在容量、频谱利用率和变址灵活性方面与WDMA技术还有很多差距,必须借助数字相干接收技术提升能力,才能为下一代软定义光网提供新型安全抗截获、多址接入的解决方案。

因此要想成为下一代软定义光网络的重要应用技术,光码分多址就必须向数字相干OCDMA系统的方向逐



▲图4 美国约翰霍普金斯大学的外差检测相干OCDM系统实验

渐发展。

3 软定义光网络中OCDMA系统所面临的关键问题

OCDMA技术要迈向下一代软定义光网络必须解决跨WDM传送网应用的频谱兼容、长距离传输动态可调谐色散补偿和多址干扰对系统误码率性能的影响3方面的问题。

3.1 跨WDM传送网应用的频谱兼容问题

典型例子就是OCDMA抗截获通信系统的跨中继段应用问题。跨中继段应用是OCDMA防窃听通信系统能否在软定义光网络中端到端配置的关键,是面向国防信息安全的高速率(大于等于2.5 Gb/s)、长距离(大约1 000 km)光纤通信的关键。可以通过奈奎斯特间隔子载波时频域数字编解码方式,在30 GHz带宽内实现高性能OCDMA编解码。

3.2 长距离传输动态可调谐色散补偿问题

OCDMA通信系统由于占有相对较宽的光谱,因此具有较小的接收机色散容限,具有动态可调谐色散补偿能力的OCDMA数字接收机,是适应不同传输距离、不同色散管理链路应用的关键。本课题拟借助数字域实时信号处理的强大能力,从信道的精

确噪声模型出发,探索适合OCDMA系统的最大似然序列估计(MLSE)均衡算法,最终解决OCDMA通信系统的色散补偿问题,并为复杂噪声干扰光纤通信系统中的信道均衡这一问题提供可借鉴的方法。

3.3 多址干扰对系统误码率性能的影响问题

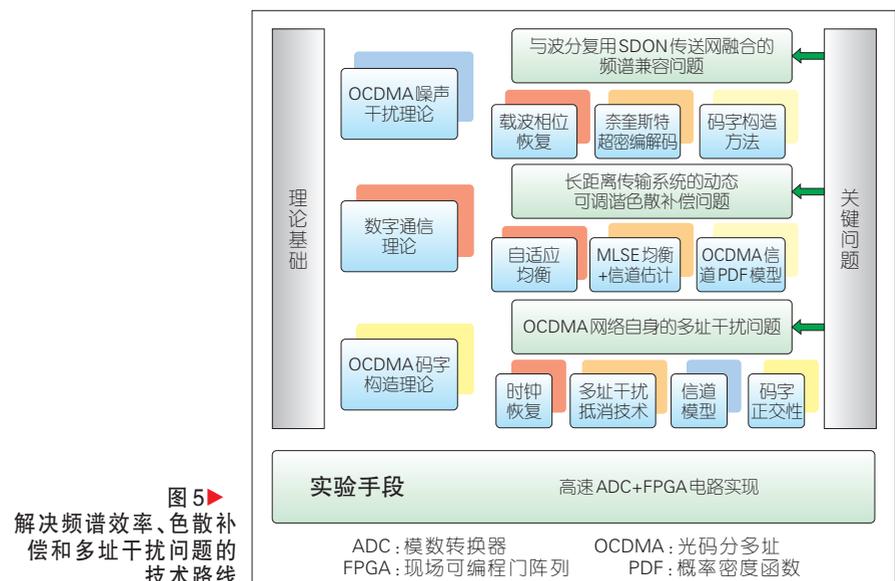
光纤通信中的时钟数据恢复(CDR)方法无法适应OCDMA信号接收,光阈值和时间门等光学非线性信号处理的方法不具备设备应用的条件,因此具有抑制干扰能力的接收机是OCDMA系统能否走向应用的关键。必须通过15~40 GHz带宽的商

业成熟的光电检测器+模数转换器(PD+ADC)无损采样,然后借助实时数字信号处理工具与方法,在数字域实现干扰抵消和数据恢复。

4 解决关键技术的技术路线

要解决OCDMA应用于SDON网络所面临的频谱效率、色散补偿和多址干扰问题,必须将业已成熟的数字通信理论用于OCDMA传输系统,借鉴其中的载波相位恢复、时钟恢复、信道估计与均衡等算法,所用的理论研究方法还包括OCDMA码字构造与正交性、光纤光栅编解码、OCDMA噪声干扰理论。如图5所示。

如图5所示, OCDMA技术向



SDON 网络应用发展必须开展如下 3 方面的研究:

(1) 针对于 WDM 传送网频谱兼容问题,从 OCDMA 码字构造出发,借鉴接入网中奈奎斯特超复用方案,探索具有高频谱效率的动态可重构电域编码方案。

(2) 针对 OCDM 信号长距离跨中继传输的动态色散补偿要求问题,基于数字通信理论中 MLSE 信道均衡算法,采用 OCDMA 精确信道模型,为 MLSE 均衡算法中的信道估计提供精确模型。

(3) 针对 OCDM 系统中严重的多址干扰问题,从码字正交性入手,针对 OCDMA 信道模型,探索数字域干扰抵消方法,为时钟提取和阈值判决提供算法支持。

5 结束语

本文认为 OCDMA 编解码技术的研究现状可分为全光编解码现状和电编码相结合的研究 2 类,其中全光编解码研究报道较为深入全面,但是存在频谱效率低、色散补偿困难和多址干扰严重等问题。本文提出了应用于 SDON 网络软件定义光编解码技术应当采用电域编解码和数字相干接收机技术,必须能够解决与 OTN 频谱兼容问题、长距离跨中继传输的可调谐色散补偿问题和自身多址干扰问题。

致谢:

本研究构想由解放军理工大学通信工程学院 OCDMA 课题组共同讨论完成,方涛副教授、郑吉林博士、项鹏博士,以及博士研究生朱华涛、陈大雷、苏国瑞同学承担了大量文献阅读和分析工作,向他们谨致谢意!

参考文献

- [1] JAAFAR H B, ROCHELLE S L, CORTÈS P-Y. 1.25Gb/s transmission of optical FFH-CDMA signals over 80km with 16users [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 17-

22 March 2001, Anaheim, CA, USA, OFC2001: TuV3-1

- [2] TEH P C. A 4-channel WDM/OCDMA system incorporating 255-chip,320Gchip/s quaternary phase coding and decoding gratings [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 17-22 March 2001, Anaheim, CA, USA, OFC2001: PD37-1
- [3] WANG X, WADA N, HAMANAKA T, KITAYAMA K, NISHIKI A. 10-user, truly-asynchronous OCDMA experiment with 511-chip SSFBG en/decoder and SC-based optical thresholder [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 11-16 March 2005, Anaheim, CA, USA, OFC2005: PDP33
- [4] CINCOTTI G. Design of Optical Full Encoders/Decoders for Code-Based Photonic Routers [J]. IEEE/OSA JLT, 2012, 22(7): 1642-1650
- [5] HERITAGE J P, WEINER A M, THURSTON R N. Picosecond pulse shaping by spectral phase and amplitude manipulation [J]. Opt. Lett., 1985, 10(12): 609-611
- [6] HERNANDEZ V J. 320-Gb/s Capacity (32 Users x 10 Gb/s) SPECTS O-CDMA Local Area Network Testbed [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 9-12 March 2006, Anaheim, CA, USA, OFC2006: PDP45
- [7] KANEKO S, SUZUKI H, MIKI N. Experimental Demonstration of Phase-Matched OCDM Using PLC-LN Multi-Frequency Self-Homodyne Module [C]//Proceedings of the ECOC2008, 21-25 September 2008, Brussels, Belgium, ECOC2008: 6-14
- [8] YOSHINO M, KANEKO S, TANIGUCHI T. Beat Noise Mitigation of Spectral Amplitude Coding OCDMA Using Heterodyne Detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(8): 962-970
- [9] KANEKO S, SUZUKI H, MIKI N. Beat-Noise-Free OCDM Technique Employing Spectral M-ary ASK Based on Electrical-Domain Spatial Code Spreading [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 21-26 March 2009, Anaheim, CA, USA, OFC2009: OTh15
- [10] KANEKO S, KIM S Y, MIKI N. Spectral Multi-Level ASKx BPSK OCDM Based on Electrical-Domain Spatial Code Spreading and Self-Homodyne Detection [C]// Proceedings of the ECOC2010, 11-16 September 2010, Brussels, Belgium, ECOC2010: 6-11
- [11] COOPER A B, KHURGIN J B, XU S M, KANG J U. Phase and Polarization Diversity for Minimum MAI in OCDMA Networks [J]. IEEE JSTQE, 2007, 13(5): 1386-1395
- [12] YANG Y, FOSTER M, KHURGIN J B, COOPER A B. Heterodyne detection using spectral line pairing for spectral phase encoding optical code division multiple access and dynamic dispersion compensation [J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17600-17610
- [13] YANG Y, PETRILLO K G, TING H F, KHURGIN J B, COOPER A B, FOSTER M A. Experimental demonstration of coherent OCDMA using heterodyne detection [J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2351-2362
- [14] DAI Y T. 511-chip, 500Gchip/s OCDMA En/decoders Based on Equivalent Phase-shift

Method [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 9-12 March 2006, Anaheim, CA, USA, OFC2006: OFF2

- [15] 陈小刚, 黄德修, 元秀华, 夏舸. 2 x 40 Gb/s OCDM using superstructure fiber Bragg gratings en/decoder [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 12(2): 22-25
- [16] PU T. Novel Encoder/decoder using Sub-Sampled Bragg Grating for a WDM Compatible OCDMA System [J]. IEEE/OSA PTL, 2007, 19(22): 1807-1809
- [17] PU T, LI Y Q, WANG R, ZHU Y X, CHEN P, LU L, CHEN X F. Using Sub-sampled Fiber Bragg Gratings to Achieve Laser Sources Compatible OCDMA En/decoders [C]// Proceedings of the ECOC2007, 16-21 September 2007, Brussels, Belgium, ECOC2007: 279-280
- [18] 卢麟, 蒲涛, 余罗陈, 郑吉林, 方涛, 李玉权. 双用户 2.5Gb/s 100 km 光码分多址传输实验 [J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2087-2093
- [19] CHENG Y, LI J S, YIN Z W, PU T, LU L, ZHENG J L, CHEN X F. OCDMA En/Decoders Employing Multiple π Equivalent Phase Shifts [J]. IEEE/OSA PTL, 2009, 21(24): 1795-1797
- [20] ZHENG J L, WANG R, PU T, LU L, FANG T, SU Y, LI L, YANG Q, CHEN X F. Dispersion-compensating en/decoder for a time-spreading/wavelength-hopping optical code-division multiplexing (OCDM) system [J]. Optica Applicata, 2013, 43(3): 485-495
- [21] ZHENG J L, WANG R, PU T, LU L, FANG T, SU Y, LI L, CHEN X F. Phase-controlled superimposed FBGs and their applications in spectral-phase en/decoding [J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8580-8595

作者简介



蒲涛, 解放军理工大学通信工程学院教授、博士生导师, 光电技术教研中心副主任; 主要研究领域为光码分多址通信和微波光子学; 已主持基金项目 7 项, 发表学术论文 60 余篇(其中被 SCI 检索 20 余篇), 出版专著 1 部、译著 1 部。



孟凡秋, 解放军理工大学通信工程学院副教授, 光电技术教研中心主任; 从事光纤通信领域教学科研 20 余年。



赵继勇, 解放军理工大学通信工程学院讲师, 光电技术教研中心光电与量子信息技术教研室副主任; 主要研究方向为光通信与光信息处理。

SDN在传送网络的引入与应用分析

SDN in Transmission Network and Application Analysis

汤进凯/TANG Jinkai
张奇/ZHANG Qi
徐昕/XU Xin

(中国移动通信集团设计院上海分院
传输所, 上海 200060)
(Transmission Dept, China Mobile
Group Design Institute Co.Ltd
Shanghai Branch Institute, Shanghai
200060, China)

软件定义网络(SDN)是近年来网络通信领域非常重要的创新,它起源于大学,最早商用于互联网公司,代表了从分布式控制再走向集中控制的技术趋势。SDN不仅对互联网、数据中心互联等网络产生重要的影响,也将会对传送网络产生深远的影响。

1 SDN 定义及发展

1.1 SDN 起源与定义

2006年,斯坦福大学一科研团队发明OpenFlow协议,通过Controller集中管控,应用于校园网络的试验创新;2009年,该研究团队首次提出了SDN软件定义网的概念,OpenFlow 1.0规范发布,获得了学术界和工业界的广泛认可和大力支持;2011年3月,开放网络基金会ONF成立,主要致力于推动SDN架构、技术的规范和发展工作。

SDN是一种网络组织方式的新

收稿日期: 2015-05-05

网络出版时间: 2015-06-22

基金项目: 上海移动重点科研攻关项目(上海科研14-615)

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0025-005

摘要: 认为软件定义网络(SDN)引入传送网可以较为显著地提升资源利用、运维管理等能力,在基站业务、集客业务、家宽业务、光缆网络等应用场景中可通过软件定义网络+分组传送网(SDN+PTN)、软件定义网络+分组传送网+光传送网(SDN+OTN)、软件定义网络+分组传送网+光传送网+无源光网络(SDN+PON)、智能光配线网络(ODN)等实现网络与SDN的结合,实现业务的灵活调度、资源利用率的有效提升、全局性的资源配置。针对每张网络的特点和技术成熟度,对传送网引入SDN的路径进行了分析,尤其针对SPTN(即SDN+PTN)的网络结构和技术要求展开了分析,并对试点情况进行了介绍。最后,对比了SDN引入前后网管的组织架构,并提出SDN引入后各层功能的变化。

关键词: 软件定义网络; 控制器; 分组传送网; 网管组织架构光网络

Abstract: In this paper, we propose that software-defined network (SDN) applied in transmission network can increase the usage of network resources and enhance OAM. The different transmission networks combined with SDN technology will evolve into SDN+PTN, SDN+OTN, SDN+PON and intelligent ODN. When SDN is deployed in some scenarios, such as base station backhaul, business private line transmission, broadband access and ODN, the network can realize the scalability of service routing, the increase of resources usage, and the network global configuration. Regarding the feature of different transport networks and the maturity of SDN, this paper analyses the roadmap of SDN application and introduces the basic environment of SDN test bed. Finally, the structures of network management with SDN applied are compared, and the change of multi-layered after SDN introduced is also proposed.

Keywords: SDN; controller; packet transport network (PTN); network management organizational structure

方法,其主要特性包括:网络控制与数据传送平面的分离;控制平面与数据平面接口的统一;逻辑集中化的控制平面架构;网络资源的可切片式及虚拟化管理。

狭义SDN:基于ONF组织发布的Openflow标准协议构建,由软件Controller、Openflow交换机组成的软件定义网络。

广义SDN:基于开放接口实现应用软件可编程的各种基础网络架构,

是软件定义思想在网络领域的延伸。

1.2 SDN 引入传送网的必要性

传送网是一张全程全网的网络,引入SDN可以较为显著地提升资源利用、运维管理等能力。对于基站业务,可增强实现统计服用、流量感知、带宽资源的动态调配,实现流量的多方向转发和控制。对于集客业务,实现多厂家环境下,跨地市、跨省专线互联协调配置;实现业务扩容和路径

调整等自动化规划调整;提高业务响应时间,缩短业务开通周期;增强网络-用户交互界面,提升用户对网络资源的直接使用感知。对于家宽业务,实现集中业务发放,提高业务发放效率,进一步缩短业务受理/开通时间,感知用户接入需求。简单地说,SDN引入传送网的价值体现在一是智能管理,提高效率;二是弹性管道,流量经营;三是业务快速响应,提升用户感知。

2 传送网引入SDN的应用场景分析

2.1 基站业务应用场景

随着LTE、LTE-A等技术的演进,基站业务呈现高带宽、低时延、横向流量需求增加等趋势,且随着用户的流动性,接入带宽弹性变动。

面向基站业务,采用SDN+PTN即SPTN的方式,可实现PTN网络集中化智能控制、高效多业务传送能力、端到端运维管理(OAM),充分发挥PTN的可规划能力,提高网络资源使用效率。通过该技术实现了基站业务统计复用,流量感知、带宽资源的动态调配;从全局的角度,用集中化的视角获取最佳路径,保证低时延;采用集中控制,实现流量的多方向转发和控制。基站业务SDN应用场景及特点如图1所示。

2.2 集客业务应用场景

集客专线业务要求快速开通、高效业务调整,针对专线业务潮汐效应提供带宽资源动态分配,提供差异化网络承载及服务等级,提升用户-网络感知及用户体验。

面向中小颗粒的集客业务,与基站业务一样,可通过SPTN技术实现双跨专线在多厂家环境下的互联协调配置;业务扩容和路径调整等自动化规划调整;应对由于潮汐效应、地理分布不均等造成的网络资源利用率低的问题。

面向大颗粒的集客业务,可承载在OTN平台,通过SDN+OTN技术实现在线网络规划、网络指标监控,保证业务可靠性;实现多层多域自动化运营,简化网络配置复杂度。家宽业务SDN应用场景及特点如图2所示。

2.3 家宽业务应用场景

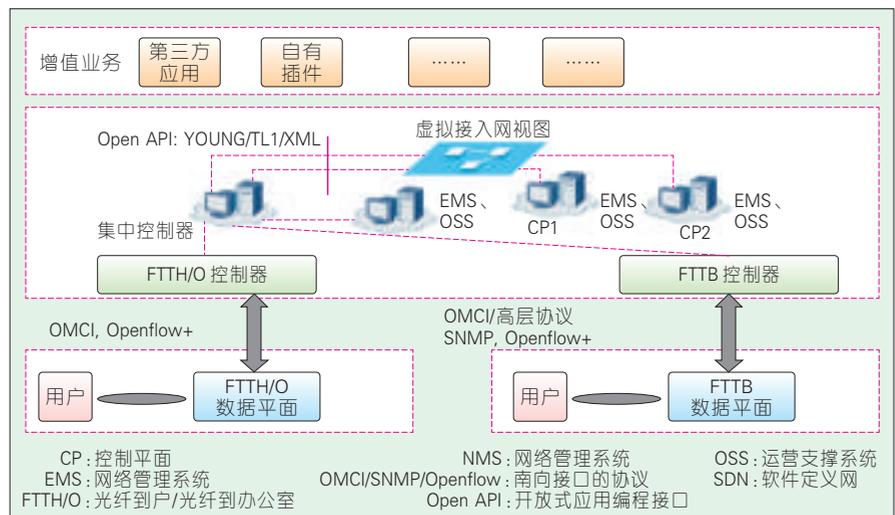
家宽业务接入方式及应用场景多样,包括联建光纤到户(FTTH)、光纤到楼(FTTB)以及合作方式的以太网通过同轴电缆传输(EOC)等,需要提供用户体验一致的异构网络;网络接入媒质多样,包括光纤、五类线、视频电缆等,接入终端多样,包括光网络终端(ONT)、多住户单元

(MDU)、家庭网关等多种形态终端,接入需要提供多设备、多场景的统一监控及维护;用户接入需求多样、市场同质化竞争激烈,需要在提升网络质量基础上,进一步改善用户体验及提升服务质量。

面向家宽业务,采用SDN+PON的方式,可简化PON的运维管理;资源按需分配,管理分权分域,异常隔离,保障VIP业务体验;具备智能业务感知能力,提升管道价值。通过该技术实现远端用户侧ONU设备控制平面上移,集中式运维管理,自动业务发放;智能业务感知及管理,用户灵活自定义业务,支持网络资源虚拟化满足多用户应用需要;智能ONT,带宽



▲图1 基站业务SDN应用场景及特点



▲图2 家宽业务SDN应用场景及特点

经营、应用加速、提升用户体验。

2.4 光缆网络应用场景

各运营商均拥有规模庞大的光交基础资源网络,光交箱/站点内光纤一般采用纸质标签标示,人工记录端口信息,手动录入资管系统;工程跳纤需多次进站,效率低、成本高。

面对光交的海量数据管理需向软件化可视化管理转型,对无源哑资源进行有源化管控。采用智能ODN,将无源资源有源化,光纤连接全程ID化管理,实现全网拓扑自动发现和动态维护,故障快速定位,降低运维成本。同时,结合设备网的SDN应用,形成有源+无源网络的端到端统一管理,业务端到端统一配置。

3 传送网SDN应用的关注点

3.1 SDN引入传送网的路径分析

如前所述,SDN在中移动等运营商的传送网中引入主要考虑PTN、OTN、PON、光交等基础网络。

从目前技术的发展和网络的部署看,在PTN引入的成熟度最高,这源于SPTN成熟度最高,能够通过现有网管系统接入Super Controller的广义结构方式下实现较多的可定义功能,对在网设备硬件条件要求较低,可实施性强。2014年在广州移动的集客业务的应用证明了SPTN的价值及效果,打通了客户界面、服务开通、资源管理、网络管理的一系列操作流程,业务性能可视,开通流程简化。

对OTN网络而言,目前许多在网OTN光层设备采用FOADM方式连接,虽也支持OpenFlow接口,但仅能实现监管,无法灵活调配光层电路;OTN电层设备则支持OpenFlow接口。基于此可优先演进至广义SDN架构,光层灵活调度功能待SDN标准成熟后适时引入,优先在电层实现软件定义功能,可实施性也较强。

对PON网络而言,在网的许多光线路终端(OLT)设备硬件结构不具

备OpenFlow接口,OLT设备芯片及主控板能力仅能满足SDN架构中部分基本功能要求,因此实施路径相对比较长。

对光交基础网络来说,SDN与之结合需要完成光纤基础网电子标签的改造;需要部署光纤资源管理系统,并对光纤资源进行集中式管控;需通过开放的北向接口与现有资源管理系统进行对接,实现统一操作平台上对基础资源的监控及调度。其部署实施将会是一个逐步的过程,先期进行试点再逐步推广。

因此,从SDN引入传送网的路径来看,PTN将是最有条件先进行部署的,OTN与光交将会逐步试点推广,PON的路径会相对长一些。而从远期看,当这几张网络都应用SDN以后,SDN与PTN、OTN(POTN)、PON以及光纤基础网络的协同管理将逐步完善,将真正实现全局管理、全局调度与疏导。

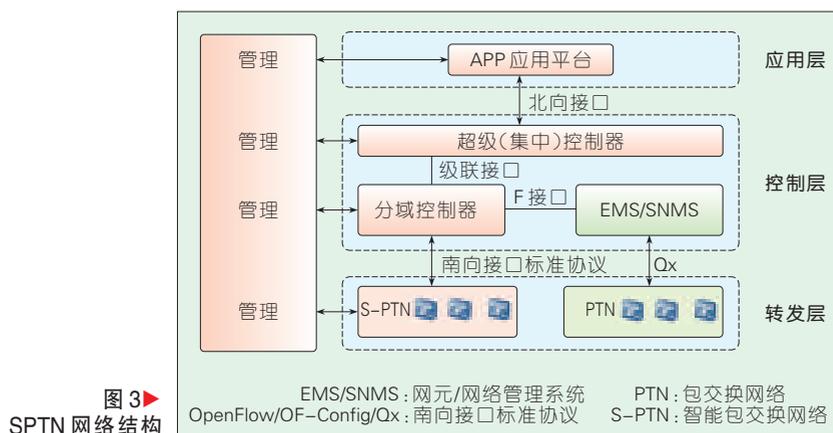
3.2 SPTN应用分析

如前所述,SDN在中移动等运营商的网络中最可能先行引入,这与中移动在PTN网络建设基础上积极倡导下一代PTN即SPTN的部署有一定的关系。传统的PTN网络致力于电信级运营保障,其发展思路与特征是静态、集中网管和端到端QoS;SDN的发展则是致力于互联网客户体验,其特征则是开放、集中控制、资源虚拟。两者的融合与创新的SPTN,综

合了两者的优点,能更好地完成集中化智能控制、高效资源利用、业务灵活调度,从而实现现有网络的平滑演进。SPTN网络结构如图3所示。

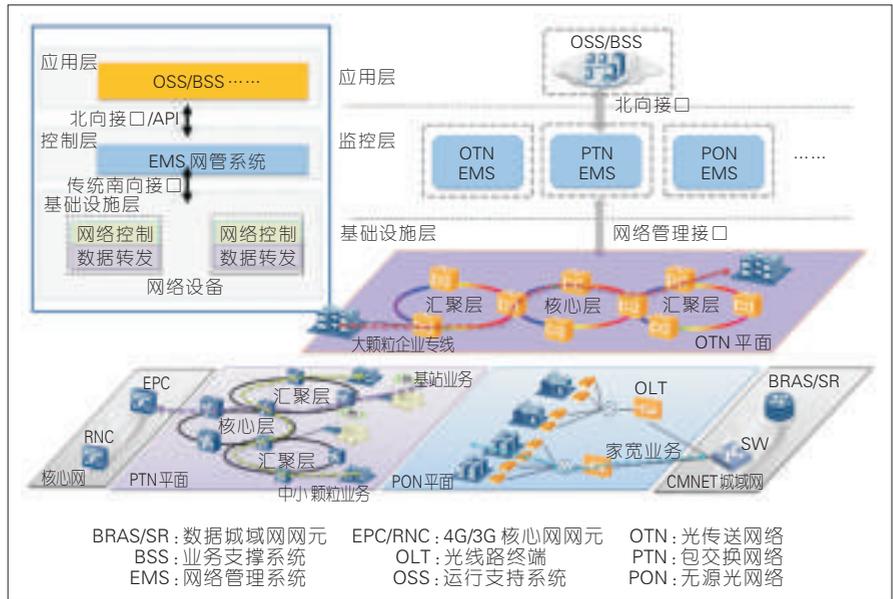
为了满足电信级运营的组网需求,SPTN采用层次化控制的技术架构。转发面采用混合组网的结构,包含传统PTN网络和新建的SPTN接入网络,传统PTN网络采用Qx接口连接EMS/SNMS,SPTN采用Openflow/OF-Config接口连接单域控制器(D-Controller)。D-Controller实现单域SPTN的业务控制和编排功能,S-Controller实现跨域SPTN的业务控制和编排功能,各种网络应用组成了应用层(包括面向运营商的O-APP和面向用户的U-APP),通过调用控制层提供的北向接口来对网络实施操作。

从总体技术要求来说,SPTN在转发层面上与现有的PTN保持兼容,新增了集中式的控制平面来增强网络的智能特性和面向应用的开发性。就转发面而言,转发面独立于控制平面或管理平面,若控制或管理平面失效,转发面仍然可以执行分组转发、OAM处理和保护倒换等功能。就集中式SDN控制而言,作为电信承载网络,SDN控制器需要支持大规模组网能力,可以控制2万个以上的网元。就高可靠、高安全的网络而言,生存性是对电信级网络的可用性要求之一,转发层的PTN设备已经具有硬件实现的运营级业务保护,引入SDN后,整网的业务保护和恢复可以进一



步发挥集中控制的优势,容易通过控制器在转发设备主备业务通道都失效后实现整网业务重新计算和业务恢复。

2014年年中中国移动在广州进行了PTN网上的SDN试点:在3个不同站点部署了4台SPTN客户端设备,既有PTN承载网对业务进行透明传送;在站点3中设置Controller服务器、Super_controller服务器、流媒体服务器、测试仪表等;测试平台对“专线业务自动化开通”、“业务扩容主动提醒,客户自助带宽调整”、“自助查看业务流量和SLA”等功能进行在线终端测试,测试结果良好。目前,中国移动在上海等省份进行进一步的SPTN试点应用,有望加快应用的相关进程。



▲图4 传统传送网管组织架构

3.3 SDN引入传送网后的组织架构分析

3.3.1 SDN引入前的网管组织架构

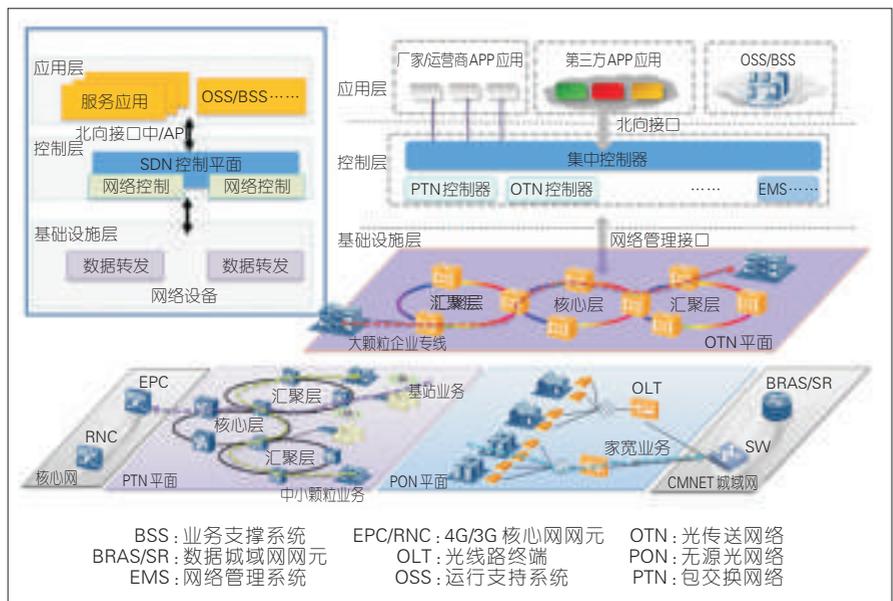
传送网的传统网管组织一般各张网络各成体系,如图4所示。

传统的传送网网管特点如下,一是北向接口仅和支撑系统连接,无法实现移动端式的在线管理;二是采用传统南向接口,各厂商接口未统一,管理范围仅限单一网络;三是网络控制和数据转发分布式部署于各网元。

3.3.2 SDN引入后的组织架构

SDN引入后的传送网网管组织架构如图5所示。

引入后的传送网网管特点如下,一是统一北向接口,开放API,通过APP方式实现运维管理多功能在线操作、提升用户体验。二是采用兼容模式同时支持OpenFlow及传统EMS方式,并与SDN架构融合。三是将各网元的网络控制功能逻辑集中,可通过分域控制器进行业务分域资源分配,简化规划及运维;通过集中控制器实现业务端到端业务发放及最佳



▲图5 SDN引入后传送网管组织架构

路由调度,提升网络资源使用效率。

4 结束语

传送网在过去一直在电信级运营保障不断完善和发展,SDN恰恰基于互联网的客户端得到快速的发展,两者的结合将会带来传送网领域非常重要的创新发展^[1-14]。在技术的持续推进、业务的发展和运维模式不断创新的多重推动下,SDN在传送网

的引入和应用将取得突破,PTN将是最有条件先行部署的,OTN与光交将会逐步试点推广,PON的路径会相对长一些。在引入SDN后,网管组织架构也将发生重大的变化,统一北向接口,开放API,通过APP方式实现运维管理多功能在线操作、提升用户体验。长远看,当这几张网络都应用SDN以后,SDN与PTN、OTN(POTN)、PON以及光纤基础网络的协同管理

将逐步完善,将真正实现全局管理、全局调度与疏导。

参考文献

- [1] ONF, Software-Defined Networking: The new Norm for Networks [S]. ONF White paper, 2012
- [2] ONF, Optical Transport Use Cases [S]. ONF White paper, 2012
- [3] STEVEN G, NABIL B, TIEJUN J. Extending Software Defined Network Principles to Include Optical Transport [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 22(2): 60-64
- [4] 中国移动通信集团有限公司上海分公司, 2014年上海移动传送网络管理与发展演进规划研究 [S]. 中国移动通信集团有限公司, 2014
- [5] 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
- [6] BENSON T, AKELLA A, MALTZ D A. Network traffic characteristics of data centers in the wild [C]//Proceedings of the Internet Measurement Conference, Melbourne, Australia, 2010
- [7] MENDONCA M, NUNES B A A, NGUYEN X N, et al. A survey of software-defined networking: past, present, and future of programmable networks [J]. IEEE Communications Society, IEEE, 2014, 16(3): 1617-1634
- [8] SHAH S A, FAIZ J, FAROOQ M, et al. An architectural evaluation of SDN controllers [C]//Proceedings of the 2013 IEEE

- International Conference on Communications (ICC), London,UK, 2013
- [9] KAUDULA S, SENGUPTA S, GREENBERG A, et al. The nature of data center traffic: measurements & analysis [C]//Proceedings of the Internet Measurement Conference, Chicago, Illinois, 2009
- [10] JARCSHEL M, OECHSNER S, SCHLOSSER D, et al. Modeling and performance evaluation of an Openflow architecture [C]// Proceedings of the 23rd International Teletraffic Congress International Teletraffic Congress, San Francisco,USA, 2011
- [11] JARSCHER M, LEHRIEDER F, MAGYARI Z, et al. A flexible Open Flow-controller benchmark [C]//Proceedings of the 2012 European Workshop on Software Defined Networking(EWSDN), San Diego, CA,USA, 2012
- [12] TOOTOONCHIAN A, GORBUNOV S, GANJALI Y, et al. On controller performance in software-defined networks [C]//Proceedings of the USENLX Workshop on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services(Hot-ICE), San Jose, CA, 2012
- [13] HANDIGOL N, HELLER B, JEYAKUMAR V, et al. Reproducible network experiments using container-based emulation [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, Guilin, China, 2012
- [14] AZODOLMOLKY S, WIEDER P, YAHYAPOUR R. Performance evaluation of a scalable software defined networking deployment [C]//Proceedings of the 2013 Second European Workshop on Software

Defined Networks(EWSDN), Singapore, 2013

作者简介



汤进凯,中国移动通信集团设计院上海分院传输所副所长、高级工程师;主要研究领域为光传送网规划设计及SDN研究;已主持基金项目近10项,获得科研成果奖3项;已发表学术论文10余篇。



张奇,中国移动通信集团设计院上海分院传输所光传送网、宽带接入网等项目负责人、高级工程师;主要研究领域为光传送网规划设计及SDN研究;已参加基金项目3项,申请专利6项;已发表学术论文3篇。



徐昕,中国移动通信集团设计院上海分院传输所工程师;主要研究领域为光传送网规划设计及SDN研究;已参加基金项目3项;已发表学术论文3篇。

←上接第19页

数据平面、控制层和协同层3个层次,构建出新形态的智能、灵活、可管、可控的软件定义接入网,从而实现业务的自动编排和跨域协同,并逐步融入到电信公用网的整体SDN/NFV规划部署中,最终打破传统网络的限制,完成向软件定义接入网的灵活转型。其中涉及到系统模型和演进路线、设备硬件架构设计、控制器的设计与实现及标准化的协议接口等关键技术。

SDN/NFV是网络发展演进的新方向,同时也是一个循序渐进的过程。在实际发展和演进过程中需结合不同阶段的业务需求及网络技术实际情况,分阶段地完成部署和改造,从而使宽带接入网在向智能、开放、灵活演进的同时,达到降低宽带接入网的建设成本(CAPEX)和维护成本(OPEX),提升用户体验,促进业

务创新的目的。

参考文献

- [1] BBF. SD-313. High level requirements and framework for SDN in telecommunication broadband networks [S]. BBF. 2015
- [2] BBF. SD-340. Stage 1 for introduction of NFV in MSBN [S]. BBF. 2015
- [3] BBF. WT-345. Migrating to NFV in the context of WT-178 [S]. BBF. 2015
- [4] ONF. TR_SDN_ARCH_1.0_06062014. SDN Architecture 1.0 [S]. ONF. 2014
- [5] ONF. OpenFlow Switch Specification 1.4.0 [S]. ONF. 2013
- [6] ONF. OpenFlow management and configuration protocol (OF-CONFIG) v1.2 [S]. ONF. 2014
- [7] ONF. Software-defined networking: The new norm for networks [S]. ONF. 2012
- [8] ETSI. GS NFV 001 V1.1.1. gs_NFV001v010101p. Network Functions Virtualisation (NFV) [S]. ETSI. 2013
- [9] OPENDAYLIGHT. OpenDaylight: A Linux Foundation Collaborative Project [S]. OPENDAYLIGHT. 2013
- [10] 赵永利, 吴家林, 张杰. 软件定义光接入网 [J]. 中兴通讯技术, 2014,5(11):38-41
- [11] 纪越峰. 软件定义光网络的机遇与挑战 [J]. 中兴通讯技术, 2014,5(11):42-44
- [12] 软件定义的接入网:未来接入网网络架构 [EB/OL]. [2015-05-12]. http://www.huawei.com/ilink/cn/solutions/broadband-smarter/morematerial-b/HW_188771

作者简介



沈成彬,中国电信股份有限公司上海研究院基础网络部主任、教授级高级工程师;主要研究领域为宽带光接入与IP网络技术及其应用;已主导制订了多项BBF、IEEE、ITU-T、CCSA标准,发表学术论文20余篇。



蒋铭,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、博士、教授级高工;主要研究领域为光纤接入网,目前研究兴趣为下一代PON及SDN。



曾涛,中国电信股份有限公司上海研究院工程师;主要研究领域为PON及智能ODN、下一代PON及SDN;已发表学术论文5篇。

在SDON中面向成本优化的虚拟光网络映射方法

Cost-Optimized Virtual Optical Network Mapping Approaches in Software-Defined Optical Networks

陈博文/CHEN Bowen
王曉玲/WANG Xiaoling
沈綱祥/SHEN Gangxiang
(苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006)
(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

随着超高清视频业务、移动业务、大数据、云服务的快速增长, 互联网业务与应用呈现出巨大带宽增长态势, 正推动光网络资源向着开放性方向发展。在大规模光组网和多种网络技术融合的背景下, 不同网络资源之间相互耦合与叠加, 形成了多种网络的运营环境, 加剧了网络业务调度、网络资源管理、网络运营成本控制的难度, 特别是在大规模组网结构下网络资源效率问题。针对这一难题, 可以根据用户实际需求出发, 通过软件定义光网络组件可编程技术, 充分运用网络功能与网络资源虚拟化技术, 通过业务统一控制、管理、分发, 采用网络资源虚拟化抽象功能, 提高网络灵活控制与管理能力。为了适应光网络虚拟化技术的快速发展, 通过把软件定义光网络资源抽象方式, 用户能够灵活自由配置所需

收稿日期: 2015-05-05
网络出版时间: 2015-06-22
基金项目: 国家自然科学基金 (61322109、61172057、61307082)

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0030-06

摘要: 结合软件定义光网络和光网络资源虚拟化的技术背景, 对虚拟光网络成本优化问题进行了深入研究。在软件定义光网络中采用软件定义光网络基础服务架构和网络资源抽象的虚拟光网络服务架构, 通过引入虚拟光网络的映射模型, 提出了虚拟光网络映射策略和虚拟光网络协同映射规划方法, 解决了面向成本优化的虚拟光网络映射方法, 可为未来光网络虚拟化技术的应用提供技术支撑。

关键词: 软件定义光网络; 虚拟光网络; 网络成本优化; 映射方法

Abstract: In order to address cost optimization problems of virtual optical network (VON) mapping, software-defined optical network (SDON) architecture and VON mapping architecture are proposed. With the VON mapping model, the VON mapping strategies and the coordinated virtual nodes and virtual links mapping approaches are proposed to reduce the network cost. Network cost optimization problems are solved by the proposed VON mapping approaches. Therefore, some important technical supports will be provided by employing the proposed VON mapping models and approaches in the future.

Key words: SDON; VON; network cost optimization; mapping approach

的网络资源, 网络运营商能够最大程度地利用网络资源, 并能够保证光网络服务质量。因此, 研究光网络虚拟化优化技术将成为关键问题。

在虚拟光网络(VON)的服务需求驱动下, 光网络虚拟化可以消除光网络的资源分配与调度僵化, 促进光网络架构和服务的创新^[1-5]。虚拟光网络能够使用户在同一个物理光网络配置需要的带宽资源, 以满足用户动态可配置光层的网络资源要求。同时, 在虚拟光网络映射到物理光网络中, 需要考虑虚拟光网络映射的生存性^[6-9], 以保证网络高可靠的服务质量。用户通过网络运营商提供标

准接口运行不同的网络资源, 以降低网络成本、节省能量消耗、提高频谱效率。为了使虚拟光网络映射到软件定义光网络, 需要根据不同优化目标, 提出相应的虚拟光网络映射算法, 从而解决虚拟光网络^[10-13]的映射问题。在软件定义光网络中, 为了提高网络的管理和运营能力, 通过恰当选择承载业务的线速率和相应调制格式, 提出多目标成本和频谱优化方法^[14], 保证网络的成本和频谱效率最优化。从多层网络资源优化设计入手, 通过多流光转发器的切片化, 采用了网络成本效率评估模型, 可以有效减少网络的成本^[15]。然而, 这些文

文献都缺乏对虚拟光网络成本优化问题的研究。

一般地,为了满足用户对网络资源的灵活配置需求,软件定义光网络通过资源虚拟化的服务方式,使不同用户能够通过规范的接口,在同一个软件定义光网络中灵活配置与调度网络资源,以满足用户或网络运营商的服务需求。然而,如何把虚拟光网络映射到软件定义光网络中,是提高光网络的频谱效率、降低网络成本、节省网络能耗的关键问题。本文主要介绍软件定义光网络基础服务架构,讨论基于网络资源抽象化的虚拟光网络服务架构,通过引入虚拟光网络的映射模型,提出虚拟光网络的映射策略和虚拟光网络协同映射规划方法。

1 基于软件定义光网络的虚拟光网络服务架构

1.1 软件定义光网络服务架构

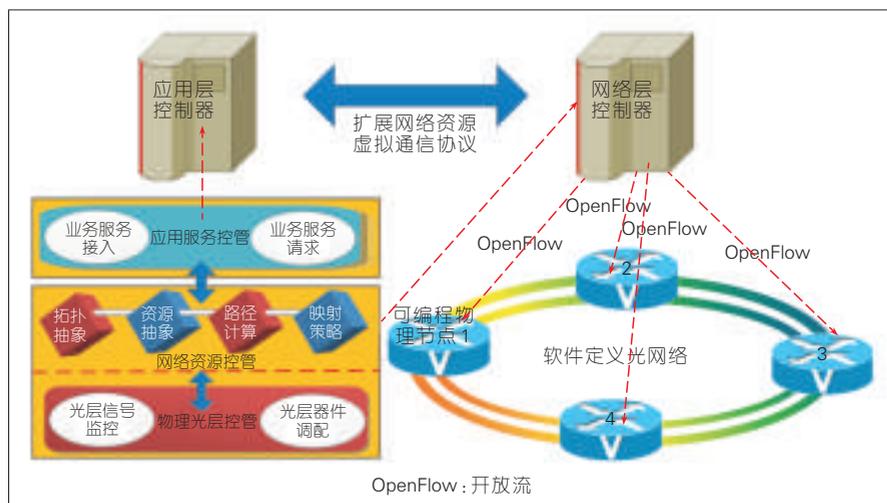
软件定义光网络(SDON)是指光网络的物理基础结构和网络功能可以根据用户或运营商需求,利用软件编程的方式进行动态接入、管理、控制、调度。图1展示了软件定义光网络服务架构,主要包含软件定义光网络物理基础结构、物理光层控管平面、网络资源控管平面、应用服务控

管平面。首先,软件定义光网络的关键部件是基于开放流(OpenFlow)协议控制器。它拥有全局的网络拓扑信息、进行全网拓扑信息获取与维护;可以获取全网资源信息状态,并进行网络资源虚拟化抽象,集中网络资源信息,以及统一分配与调度资源;根据网络业务流量服务需求,对业务进行路由计算、控制网络流量、记录业务转发状态。其次,网络控制器一方面通过 OpenFlow 控制协议对物理光层信号质量监控和网络资源虚拟与抽象,对网络节点进行智能软件编程控管;另一方面,通过扩展网络虚拟资源协议,采用网络层控制器与应用层控制器协同联动控管技术,应用层控制器通过对应用服务请求的接入功能进行调控,优化网络资源配置与节省网络运营成本等。最后,基于 OpenFlow 协议控制器的核心功能在于光网络组件的可编程性,包括网络业务处理方式可编程、控制与管理方法可编程、传输设备功能可编程等,并且具备业务动态灵活配置与开放式控制接口的最佳适配能力。根据设计不同的目标函数,通过引入不同的虚拟光网络映射模型,按照预先设定的虚拟光网络映射策略与算法,运行不同的虚拟光网络映射方法,提高软件定义光网络的资源利用效率和降低网络运营成本。

可见,软件定义光网络通过利用基于 OpenFlow 协议控制器提供开放式可编程网络控制接口,采用资源虚拟化抽象算法与控制策略,可以对不同网络层业务进行分类管理,实现业务分组和光网络资源可重构的集成控制与管理,以适应多种业务类型在不同传送设备之间互联与互通。软件定义光网络提供商的目标是实现网络资源利用率最大化,并以网络资源的虚拟化为实现技术手段,最大程度都节省网络成本,提高软件定义光网络的运营效益。因为通过网络资源的虚拟化技术,用户可以根据网络资源抽象功能和硬件模块可编程特性,可以动态灵活调整网络组件相关参数,满足用户的服务需求。此外,通过基于 OpenFlow 协议的网络层控制器与应用层控制器的协同技术,进行虚拟网络资源的自适应抽象、映射、解析、分配等过程处理,用户能够有效地建立业务带宽资源,分配软件定义光网络的网络资源,提高软件定义光网络资源统一管理和灵活调度能力,实现网络虚拟化的多目标优化,特别是网络成本优化问题。

1.2 基于可编程网络资源配置的虚拟光网络服务架构

对于软件定义光网络,通过基于 OpenFlow 协议控制器的代理商(Agent)对每一条光纤链路的频谱资源进行抽象,以集中网络资源信息和记录所有频谱资源使用状态,形成具有开放性与可编程性的网络资源抽象与集中管理系统。在每一个可编程物理节点上配置统一标准接口,并拥有一定计算能力,利用可编程物理节点控制与网络资源管理机制,以快速、高效地适配网络资源的调度功能。为了使网络的运营成本最优化,通过基于 OpenFlow 协议的网络控制器统一监控网络器件和网络资源使用状态,包括光转发器与光再生器工作状态,并能够结合虚拟光网络的业务请求变化特点,并能够自适应地调



▲图1 软件定义光网络服务架构

节网络的频谱资源和可编程的硬件资源,满足虚拟光网络的带宽资源需求。在基于OpenFlow协议控制器中,根据用户或网络运营商的优化目标,可以通过嵌入不同的虚拟光网络映射策略,形成基于OpenFlow协议控制器对软件定义光网络资源集中与统一开放的管理与调度机制,通过扩展OpenFlow协议的方式进行网络软件与硬件资源优化分配,降低网络的运营成本。

在软件定义光网络中,根据用户对网络资源的服务需求,基于OpenFlow控制协议控制器,对可编程物理节点进行监控和光层网络资源管理,采用软件定义光网络资源抽象虚拟化管理机制,运用不同网络资源映射算法、策略、规划方法,动态灵活调配网络资源,使软件定义光网络的资源达到最佳分配与利用状态,从而减少网络运营成本。根据软件定义光网络资源虚拟化的特点,可以定义基于网络资源抽象化的虚拟光网络服务架构,如图2(a)所示。它是由两个不同的虚拟光网络组成,即VON₁和VON₂。在每一个虚拟光网络服务请求中,虚拟节点(VN)代表需求服务资源(如计算资源),虚拟链路

代表了两个虚拟节点之间的带宽需求,用传输速率大小(#Gbps)为标记。如图2(b)所示,在软件定义光网络中,可编程物理节点代表网络器件,主要包括光转发器和光再生器等,并能够提供服务计算资源,每一条物理链路提供充足的频谱资源。对于每个虚拟光网络,需要在软件定义光网络中找到它的虚拟节点映射及它的虚拟链接映射。对于每一条虚拟链路,根据虚拟链路的带宽需求,需要在软件定义光网络中找到一条工作路径,并且选择恰当的传输速率和调制格式,为虚拟链路分配频谱资源。通过基于OpenFlow协议对软件定义光网络资源优化配置,使网络资源达到最佳状态,节省网络器件使用数目,从而优化软件定义光网络的运营成本,提高软件定义光网络的频谱资源效率。

2 面向成本优化的虚拟光网络映射方法

2.1 虚拟光网络的映射模型

软件定义光网络可以用有向图 $G^p(V^p, E^p, C^p, B^p)$ 表示,这里 V^p 、 E^p 、 C^p 和 B^p 分别表示可编程物理节点集

合、物理链路集合、可编程物理节点提供最大容量的计算资源、每一条光纤链路的频谱间隙总数。一组虚拟光网络集合用 $G^v(V^v, E^v, C^v, B^v)$ 表示,这里 V^v 、 E^v 、 C^v 、 B^v 分别表示虚拟光网络的虚拟节点集合、虚拟链路集合、虚拟节点的计算资源需求数、虚拟链路需求的带宽数。在一组虚拟光网络集合中, $G_i^v(V_i^v, E_i^v, C_i^v, B_i^v) \in G^v(V^v, E^v, C^v, B^v)$ 表示第*i*个虚拟光网络,分别映射到软件定义光网络 $G^p(V^p, E^p, C^p, B^p)$ 中。如果软件定义光网络的可编程物理节点提供计算资源 C^v 超过了虚拟节点需要的计算资源 C_i^v 时,一方面,通过节点映射机制 $M_v(f: V_i^v \rightarrow V^p)$,可以把第*i*个虚拟光网络的虚拟节点 V_i^v 映射到物理节点 V^p 上;另一方面,把虚拟链路 E_i^v 通过链路映射机制 $M_e(f: E_i^v \rightarrow P_w^p)$,把这条虚拟链路映射到软件定义光网络的工作路径 P_w^p 上,并在这条工作路径上分配相应的频谱资源,在频谱资源分配过程中需要满足频谱连续性与频谱一致性双重约束条件。

由于光转发器和光再生器的数量依赖于光通道的线速度、频谱宽度、调制格式,虚拟光网络映射到软件定义光网络的成本因素只考虑这两种网络器件。对于每一条虚拟链路,在其映射到软件定义光网络的可编程节点对中,需要在可编程源节点与宿节点配置一对光转发器。如果虚拟链路的带宽业务在这条通道中传输距离超过光信号最大的传输距离,在中间可编程节点上配置相应数量的光再生器,以满足光信号的传输质量。这里定义软件定义光网络的成本模型(NC)为公式(1)所示。

$$NC = \sum_{j=0}^{|C^v|} \sum_{i=0}^{|E^v|} 2 \cdot N_{ij}^{n,r} \cdot TC^r + \sum_{j=0}^{|C^v|} \sum_{i=0}^{|E^v|} M_{ij}^{n,r} \cdot RC^r \quad (1)$$

其中 $|C^v|$ 、 $|E^v|$ 、 TC^r 和 RC^r 分别表示一组虚拟光网络的数目、第*i*个虚拟光网络的虚拟链路总数、在线速率*r*中每一个光转发器单位成本和每一

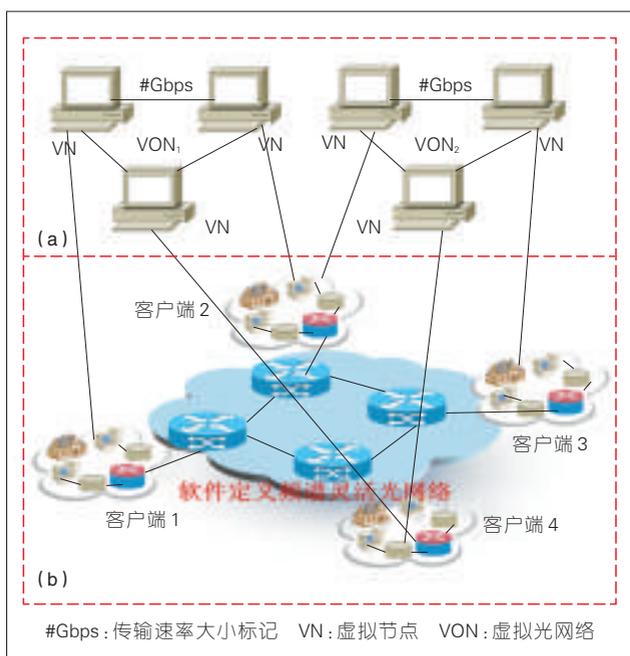


图2 基于可编程网络资源抽象化的虚拟光网络服务架构

个光再生器单位成本。在线速率 r 下, N_{ij}^{tr} 和 M_{ij}^{tr} 分别表示虚拟链路 (i,j) 映射到软件定义光网络光转发器的数量和光再生器数量。

2.2 虚拟光网络的映射策略

为了使每一个虚拟光网络的虚拟节点与链路映射到软件定义光网络,需要减少虚拟链路映射到软件定义光网络中的路径距离,以便减少业务占用可编程组件的数量,从而降低网络运营的资源成本。同时,恰当选择传输过程的线速率,通过业务流量疏导策略,可以有效配置网络可编程组件的使用状态,减少路由端口、光转发器、光再生器、光放大器的使用数目。在软件定义光网络中,为了简化虚拟光网络映射到软件定义光网络过程复杂性,可以通过预先配置所有可编程物理节点对的最短距离路径,构建软件定义光网络的可编程节点辅助图(AG)。图3(a)所示A、B、C分别代表虚拟光网络的虚拟节点,三角形的数字代表着该虚拟网络节点需求的计算资源数目,每一条虚拟链路上的数字代表着两个不同的虚拟节点之间的带宽需求。假设图3(b)是已构建的软件定义光网络的可编程节点辅助图,即预先配置每一个软件定义光网络的可编程节点对

工作路径,链路上的数字代表着每一个可编程节点对的最短距离;每一个圆圈上的数字是简化的可编程节点提供计算资源数目。对于每个虚拟光网络,需要把每个虚拟节点和虚拟链路全部映射到软件定义光网络,主要包含两种不同优先级的虚拟光网络映射策略,即虚拟链路优先映射策略和虚拟节点优先映射策略,具体描述如下:

(1) 虚拟链路优先映射策略

在虚拟光网络中,考虑不同的虚拟链路带宽需求大小,确定虚拟链路的映射顺序,通过已有虚拟节点与可编程物理节点的映射位置,根据未映射的虚拟链路在软件定义光网络中逐步扩展延伸,直到所有虚拟链路映射完成。首先,所有虚拟链路按带宽需求进行降序排列;第二,根据最大带宽需求映射到软件定义光网络的可编程物理节点辅助图的最短距离基本原则,把最大带宽需求的虚拟链路首先映射,而这条虚拟链路两端的虚拟节点依据最大计算资源需求与可编程物理节点的最大的计算资源提供进行映射。当且仅当需求的计算资源低于可编程物理节点提供的计算资源,以及两个虚拟节点不能同时映射到相同的可编程物理节点,虚拟节点才能被映射到可编程物理节

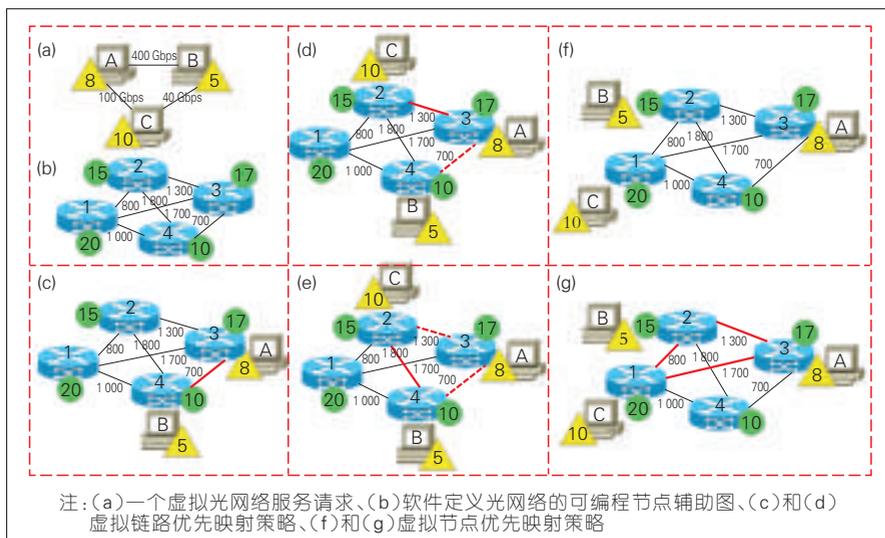
点上。第三,根据带宽需求降序排列,在软件定义光网络的可编程物理节点辅助图的链路上,从已经映射的可编程物理节点到没有映射的可编程物理节点的链路中选择最短距离物理链路,把这条物理链路作为这条虚拟链路的映射链路,这样可以保证这条虚拟链路在构建的可编程物理节点辅助图上映射距离最短。最后,虚拟光网络映射到软件定义光网络后,需要分配相应的频谱资源。在频谱资源分配过程中,需要满足频谱连续性与一致性约束条件。图3(c)-(e)展示了虚拟链路优先映射策略的例子。

(2) 虚拟节点优先映射策略

虚拟节点优先映射策略的特点是首先把虚拟光网络中的虚拟节点映射到软件定义光网络的可编程物理节点上;其次,通过虚拟光网络的拓扑特点和虚拟节点之间的连接关系,确定在软件定义光网络的传输光路径。对于第 i 个虚拟光网络,第一,根据虚拟节点的计算资源需求进行降序排列;第二,根据虚拟光网络上所有的虚拟节点的最大计算资源需求对可编程物理节点提供最大计算资源的映射基本原则,当可编程物理节点提供的计算资源超过了虚拟节点的需求时,把第 j 个虚拟节点 V_{ij}^v 映射到第 n 个可编程物理节点 V_n^p ;第三,在软件定义光网络的可编程节点辅助图上,根据虚拟光网络的拓扑连通性把所有虚拟链路映射到相应物理链路上。当把所有虚拟节点和虚拟链路映射到可编程物理节点和物理链路后,在软件定义光网络的链路中,根据不同的线路速率和调制格式分配相应的频谱资源。图3(f)、图3(g)展示了虚拟节点优先映射策略的例子。

2.3 虚拟光网络协同映射规划方法

在一个虚拟光网络中,为了映射虚拟节点和虚拟链路到软件定义光网络,同时克服虚拟节点与虚拟链路



▲图3 成本优化的虚拟光网络映射例子

之间映射相分离问题,可以采用虚拟节点与虚拟链路协同映射规划方法。这种方法描述如下:

(1)构建软件定义光网络的可编程节点扩展辅助图(EAG)。采用在2.2中描述构建软件定义光网络的可编程节点辅助图的方法,把一个虚拟光网络的所有虚拟节点加入到这个可编程节点辅助图。通过比较每一个虚拟节点的计算资源需求与所有可编程物理节点提供计算资源之间的大小关系,判定虚拟节点与可编程物理节点之间是否存在连接关系。当虚拟节点需求的计算资源小于或等于可编程物理节点时,可以用虚线把这虚拟节点和可编程物理节点连接起来,并设置这条虚线的权值被为一个极大的整数值,该整数值大于软件定义光网络的可编程节点辅助图中所有链路权值总和。

(2)根据任意两个虚拟节点的带宽需求大小,在所构建软件定义光网络的可编程节点扩展辅助图中,采用流量守恒的方法,把虚拟节点与虚拟链路的映射问题转化为传统的经典商品流问题,化解虚拟节点与虚拟链路映射相分离缺点。运用传统流量守恒方法,可以设计出虚拟光网络协同映射规划方法,优化虚拟光网络映射的网络成本。下面用一个例子说明虚拟光网络协同映射规划方法:如图4(a)所示,给定一个虚拟光网络请求,其中红色六边形代表与虚拟节点相连接的虚拟节点,它代表虚拟节点需求的计算资源请求。虚拟链路代表两个不同的虚拟节点之间的带宽需求。图4(b)表示一个软件定义光网络,这里链路上的数字代表两个不同可编程物理节点的距离(单位千米),六边形中的数字代表可编程物理节点提供的计算资源。图4(c)是软件定义光网络的可编程节点辅助图AG。AG链路的权重是任意可编程物理节点对*k*和*l*的工作路径最短距离,例如可编程节点对的链路(2,4)的权值等于可编程节点2和4的最

短路径2-3-4的距离。当虚拟节点需求的计算资源小于或等于可编程物理节点时,通过虚线把虚拟节点与可编程物理节点相连接,可以构造如图4(d)所示的软件定义光网络的可编程节点扩展辅助图(EAG)。在可编程物理节点的扩展辅助图EAG中,在同一虚拟光网络中,任意一个虚拟节点只能映射到一个可编程物理节点上,根据每一对虚拟节点的流量守恒原则,若选定虚线和软件定义光网络的可编程节点辅助图的链路作为某一对虚拟节点通过的流量路径,那么与选定虚线相连接的可编程物理节点为该虚拟节点所映射的节点,流量经过的物理链路为虚拟链路映射到链路。例如,假设从虚拟节点B到虚拟节点C的商品流(即虚拟链路(B,C))经过路径B-2-4-C,这是EAG中的最短路径。虚拟节点B和C分别映射到可编程物理节点2和4上,虚拟链路A-B映射到物理链路2-4(在图4(b)中,这条链路包括工作路径2-3-4)。在软件定义光网络中,找到虚拟链路映射的路径后,需要在这条路径上分配相应的频谱资源,并且满足频谱连续性与频谱一致性约束条件。可见,基于软件定义光网络的

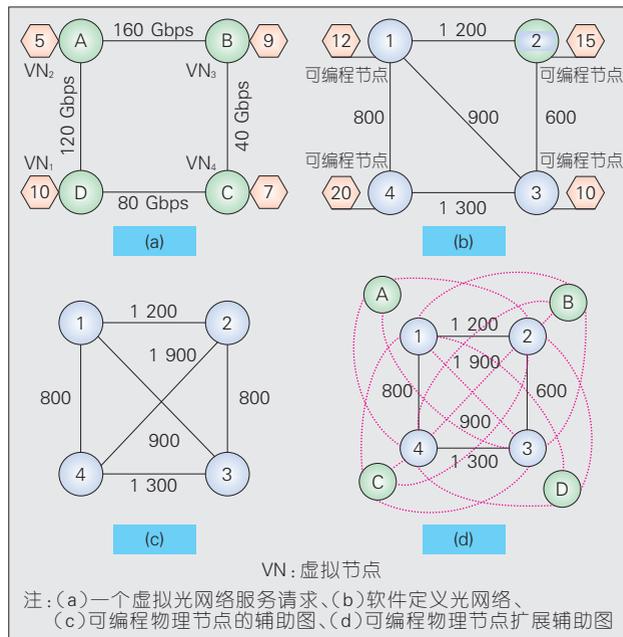


图4 基于虚拟光网络协同映射规划方法的例子

注:(a)一个虚拟光网络服务请求、(b)软件定义光网络、(c)可编程物理节点的辅助图、(d)可编程物理节点扩展辅助图

可编程节点扩展辅助图,通过采用经典商品流量守恒方法,设计出符合虚拟光网络映射到软件定义光网络的协同映射规划方法,可以有效减少网络成本问题。

3 结束语

针对虚拟光网络映射到软件定义光网络成本问题,对虚拟光网络成本优化映射方法进行深入研究。在软件定义光网络中,为了解决虚拟光网络映射成本优化问题,本文采用软件定义光网络基础服务架构,讨论基于可编程网络资源配置的虚拟光网络服务架构,构建基于网络成本构成要素的虚拟光网络映射模型,提出两种不同的虚拟光网络映射策略,即虚拟链路优先映射策略和虚拟节点优先映射策略,同时也探讨了虚拟光网络协同映射规划方法,从而解决面向成本优化的虚拟光网络映射方法。

参考文献

- [1] ZHANG S, SHI L, VADREUVU C S K, et al. Network Virtualization over WDM and Flexible-Grid Optical Networks [J]. Optical Switching and Networking, 2013, 10 (4): 291-300
- [2] XIE W, JUE J P, ZHANG Q, et al. Survivable Virtual Optical Network Mapping in Flexible-

- Grid Optical Networks [C]//Proceedings of the ICNC, Honolulu, Hawaii, USA, 2014
- [3] WANG Z, WU J, WANG Y, et al. Survivable Virtual Network Mapping Using Optimal Backup Topology in Virtualized SDN [J]. China Communications, 2014, 11 (2): 26–37
- [4] GUO B, QIAO C, WANG J, et al. Survivable Virtual Network Design and Embedding to Survive a Facility Node Failure [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 32 (3), 483–493
- [5] YU H, ANAND V, QIAO C, SUN G. Cost Efficient Design of Survivable Virtual Infrastructure to Recover from Facility Node Failures [C]//Proceedings of the ICC, Kyoto, Japan, 2011
- [6] CHOWDHURY M, RAHMAN M R, BOUTABA R. ViNEyard: Virtual Network Embedding Algorithms with Coordinated Node and Link Mapping [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(1): 206–219
- [7] RAHMAN M R, BOUTABA R. SVNE: Survivable Virtual Network Embedding Algorithms for Network Virtualization [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2): 105–118
- [8] PENG S, NEJABATI R, SIMEONIDOU D. Impairment-Aware Optical Network Virtualization in Single-Line-Rate and Mixed-Line-Rate WDM Networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013,5(4): 283–293
- [9] GONG L, ZHU Z. Virtual Optical Network Embedding (VONE) Over Elastic Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,32(3): 450–460
- [10] HYOJOON K, FEAMSTER N. Improving Network Management with Software Defined Networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51(2): 114–119
- [11] CHANNEGOWDA M, NEJABATI R, SIMEONIDOU D. Software-Defined Optical Networks Technology and Infrastructure: Enabling Software-Defined Optical Network operations [invited] [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013,5(10): A274–A282
- [12] YE Z, PATEL A N, JI P N, QIAO C. Survivable Virtual Infrastructure Mapping With Dedicated Protection in Transport Software-Defined Networks [Invited] [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015,7(2): A183–A189
- [13] CHEN H, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Experimental Demonstration of Datacenter Resources Integrated Provisioning Over Multi-Domain Software Defined Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015,33(8): 1515–1521
- [14] PEDROLA O, CAREGLIO D, KLINKOWSKI M, et al. Cost Feasibility Analysis of Translucent Optical Networks with Shared Wavelength Converters [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013,5(2): 104–115
- [15] TANAKA T, HIRANO A, JINNO M. Advantages of IP over Elastic Optical Networks Using Multi-Flow Transponders from Cost and Equipment Count Aspects [J]. Optics Express, 2014,22(1): 62–70

作者简介



陈伯文, 苏州大学电子信息学院副教授; 从事数据中心与光网络融合、绿色光通信网络、网络设计与优化、光网络生存性、光网络虚拟化、软定义光网络等研究工作; 已主持和参加 5 项基金项目; 已发表 SCI/EI 论文 20 余篇。



王晓玲, 苏州大学电子信息学院讲师; 从事频谱灵活光网络可靠性分析以及网络保护恢复技术研究; 已主持 1 项基金项目。



沈纲祥, 苏州大学电子信息学院光网络技术研究中心主任、教授、博导, 中国通信学会高级会员, IEEE 高级会员, IEEE 光与无线集成技术委员会秘书, IEEE JSAC 和 IEEE/OSA JOCN 等 4 本国际刊物的副编辑或编委; 研究领域为光网络通信; 已主持 10 余项基金项目; 已发表学术论文 100 余篇。

综合信息

纪念杂志社成立 20 周年编委会暨 2015 通信热点技术研讨会

办刊 20 周年之际,“中兴通讯技术杂志社第 21 次编委会议暨 2015 通信热点技术研讨会”于 2015 年 8 月 7—8 日在安徽省黄山市隆重召开。来自海内外高校、运营商及企业界的近百位专家学者欢聚一堂,共庆杂志社成立 20 周年,并就 2014—2015 年度的办刊工作进行总结和讨论。中兴通讯董事长侯为贵、执行副总裁田文果、执行副总裁赵先明、高级副总裁陈杰等领导专程参加会议。

编委会上,侯为贵董事长总结过去,展望未来,对刊物平台汇聚专家资源的工作成果给予充分肯定。侯董事长说:“今年是刊物 20 年、公司 30 年,让我们共同努力,促进行业更快地发展。希望各位专家与中兴通讯进一步合作,为全球电信行业做出更大贡献!”

杂志社常务副总编黄新明回顾了 20 年办刊历程以及刊物的发展成就,并向与会代表汇报了下一个 20 年的战略思考以及下年度的工作重点。会议还确定了中英文两刊 2016 年专题名称及策划人,对并各期专题组

稿计划进行了讨论。

为表彰杂志社办刊 20 年为公司做出的贡献,侯为贵董事长还代表公司为杂志颁发了“合作与传播成就奖”。

会议最终确定了《中兴通讯技术》第 7 届编委会和《ZTE Communications》第 3 届编委会人员名单。

在通信热点技术研讨会上,19 位海内外专家针对大数据、智能技术、5G、MICT 等行业热点作了精彩的技术报告。

刊物平台越来越大,参与者越来越多,平台价值也与日俱增。



软件定义光网络的编码方法与应用

Methods and Applications of Code in Software-Defined Optical Networks

肖江南/XIAO Jiangnan
余建军/YU Jianjun
迟楠/CHI Nan

(复旦大学通信科学与工程学院, 上海 200433)
(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

随着现在信息业务和网络持续增长, 以及用户对信息差异化需求等出现, 光网络的信息传输向大容量、远距离、方便性、安全可靠等方面发展。而软件定义光网络利用软件编程的方式根据用户或运营商需求, 利用软件编程方式进行动态定制, 从而具有快速响应请求、高效利用资源、灵活提供服务等优点, 使网络更具有灵活性和开放性, 是近几年光网络研究的热点之一。为满足通信网络持续增长的带宽要求, 最终实现在需要时可提供及时的、任意地点的和高速可靠的信息接入, 未来的宽带接入网络必须兼具无线通信和光纤通信这两种技术的优势并将两者进行无缝融合。采用光纤无线融合接入系统, 能够突破电子带宽瓶颈, 适用于不同场合的高速光无线融合通信^[1-5]。利用光子辅助技术产生毫米波的常见做法是采用由两个独立

收稿日期: 2015-05-05
网络出版时间: 2015-06-22
基金项目: 国家自然科学基金(61325002); 上海市科委重点基金项目(13JC1400700); 中山大学光电材料与技术有限公司国家重点实验室开放课题(OEMT-2015-KF-10)

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0036-05

摘要: 提出了一个新的产生光矢量偏移正交相移键控(OQPSK)信号方法, 该方法仅使用一个强度调制器(MZM)和载波抑制技术, 利用光电二极管的平方律检测特性, 对强度调制器驱动信号的幅度和相位进行预编码处理, 而且采用Turbo均衡技术提高了矢量正交相移键控(QPSK)信号系统的传输性能。实验证明, 传输40 km单模光纤后, 当误码率(BER)为 10^{-4} 时, 1/2和2/3码率的Turbo均衡QPSK信号的接收机灵敏度比原始QPSK信号分别提高了4 dB和3 dB。实验结果说明, Turbo均衡技术在光矢量信号传输系统中具有较好的纠错和抗色散能力。

关键词: 光纤通信; 矢量信号; Turbo均衡技术; 矢量正交相移键控信号; 软件定义光网络

Abstract: We propose a novel method to generate signal of optical vector offset quadrature-phase-shift-keying (OQPSK) by using only one Mach-Zehnder modulator (MZM) and carrier-suppression technology. By detecting the "square-law" of photoelectric diode, the amplitudes and phase of the driving signal of MZM can be pre-coded. Turbo equalization improves transmission in the QPSK signal system. The received sensitivity of QPSK turbo equalization vector signal with code rate 1/2 and 2/3 at BER = 10^{-4} after 40 km SMF transmission are increased by 4 dB and 3 dB than the original QPSK signal, respectively. The experimental results show that the QPSK signal with turbo equalization has better dispersion compensation and error-correcting ability.

Keywords: optical communications; vector signal; turbo equalization; QPSK signal; software-defined optical networks

激光器产生的光子拍频, 其中在一个光子上加载入已调制的基带信号, 而另一个波长不同的光子作为参考源, 拍频经过光电转换后就可以产生宽带的高速高频谱效率的矢量毫米波信号^[6-11]。但由于两个自由光波频率的非锁定性, 这种方法产生的毫米波频率精度不高, 相位噪声较大, 难以满足高精度测量的要求, 成本也较高。另一种方法是利用锁频锁相激光器或者光频梳的方法, 这种方法产生的毫米波频率虽然较稳定, 但也存在成本较高、结构较复杂的问题。采用基于光学调制器多倍频产生毫米

波的方法, 由于光学调制器本身具有非线性, 可以用来实现倍频的功能, 通过低频的微波信号驱动光学调制器可以产生高频率的谐波, 从而可以生成可调谐、稳定的宽带毫米波^[12-15]信号。这种方法在提高所得毫米波频率纯度的同时, 简化了光生毫米波结构的复杂度并降低成本。此外, 这种基于外部调制的光多倍频技术可以进一步与高谱效率的矢量调制相结合, 产生高谱效率的矢量毫米波信号, 同时大幅度降低对发送端光电器件带宽的要求。文献[16]使用同相/正交(IQ)调制器产生矢量正交移相

键控(QPSK)矢量信号,但由于IQ调制器使用3个直流电源来控制矢量信号的产生,这种产生方法不但系统成本高,而且系统不稳定。在光通信系统中,由于光纤色散和非线性效应产生符号间干扰(ISI),严重地干扰传输系统的传输性能。为了减少甚至消除符号间干扰(ISI),通常采取均衡技术来补偿光纤信道色散和非线性效应。Turbo均衡技术是目前较好的均衡技术之一。Turbo均衡技术将均衡技术与Turbo迭代译码技术相结合,使Turbo中的均衡器具有处理输入先验信息与输出后验信息的功能。Turbo中的均衡器与Turbo译码器进行信息交换,降低Turbo编码技术的算法复杂度。而且Turbo均衡技术保留了Turbo码的交织、译码和迭代技术等功能,在高速光传输系统中,Turbo均衡技术相对传统的均衡器与译码器分开的传输系统,传输性能明显提高。

本文使用一个强度调制器采用载波抑制技术产生QPSK矢量信号,而且使用Turbo均衡技术来提高传输系统性能。实验结果验证该技术能简化矢量信号的产生,节约系统成本,而且Turbo均衡技术能提高光纤传输系统性能。

1 矢量QPSK信号产生

原理和Turbo均衡原理

本传输系统是使用Turbo均衡技术来提高矢量QPSK信号传输系统性能,该系统QPSK矢量信号产生主要是利用光电二极管(PD)的转换规则把经过预编码的QPSK信号转换为规则的QPSK信号,而且在该系统中利用Turbo均衡技术来降低系统色散对系统的影响提高传输性能。

1.1 矢量QPSK信号产生原理

假设激光输出信号表达式为 $E_m(t) = E_1 \exp(2\pi f_c t)$,强度调制器(MZM)的调制射频信号为 $V_{driver} = \sqrt{V_{RF}} \times A \cos(2\pi f_s t + \varphi)$,则MZM输

出信号为:

$$E_{out}(t) = E_1 \exp(2\pi f_c t) \cos\left(\pi \frac{\sqrt{V_{RF}} \times A \cos(2\pi f_s t + \varphi)}{V_\pi} + \pi \frac{V_{DC}}{V_\pi}\right) \quad (1)$$

当直流偏置电压 $V_{DC} = I/(2V_p)$ 时,产生奇数阶边带,偶数边带被压制,则公式(1)为:

$$E_{out}(t) = -E_1 \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-1)^m J_{2m+1}(\beta A) \exp(j\omega_c t + j(2m+1)\omega_s t + j(2m+1)\varphi) \quad (2)$$

式中 $\beta = \pi \sqrt{V_{RF}}/V_\pi$ 是调制深度, J_n 为n阶贝塞尔函数,然后通过2个带通滤波器选取需要的对称奇数边带作为传输载波,滤波器后信号为:

$$E_{filter}(t) = (-1)^{m_1-1} E_1 J_{n_1}(\beta A) [\exp(j\omega_c t + jn_1\omega_s t + jn_1\varphi) + \exp(j\omega_c t - jn_1\omega_s t - jn_1\varphi)] \quad (3)$$

式中 $n_1 = 2m+1$,由于光电探测器的平方律检测特性,经过光电转换后信号为:

$$i_{PD}(t) = R |E_{filter}(t)|^2 = 2RE_1^2 J_{n_1}^2(\beta A) [1 + \cos(2n_1 \times 2\pi f_s t + 2n_1 \varphi)] \quad (4)$$

其中R为光电探测器转换效率。可以看出驱动MZM的射频信号f,通过本方案得到的RF信号频率为原始信号的 $2n_1$ 倍,光电转换之后信号的幅度和相位都发生了改变, i_{PD} 的相位为驱动信号的 $2n_1$ 倍, i_{PD} 的信号幅度为驱动信号幅度的 $J_2^2 I(bA)$ 倍,为了使光电探测器的输出 i_{PD} 为所需的信号,必须对原始信号进行预编码后再用于驱动MZM。将驱动信号的相位变为所需信号相位的 $1/(2n_1)$,幅度为所需信号相位的 $1/J_2^2 I(bA)$,在经过光电探测之后就可以得到正确的相位信号。

当直流偏置电压 $V_{DC}=0$ 时,奇数阶边带被抑制,偶数阶边带功率达到最大,MZM和滤波器后的输出跟上述相应的表达式类似。PD转换后的信号与式子(4)一样,在这里不再详细说明。

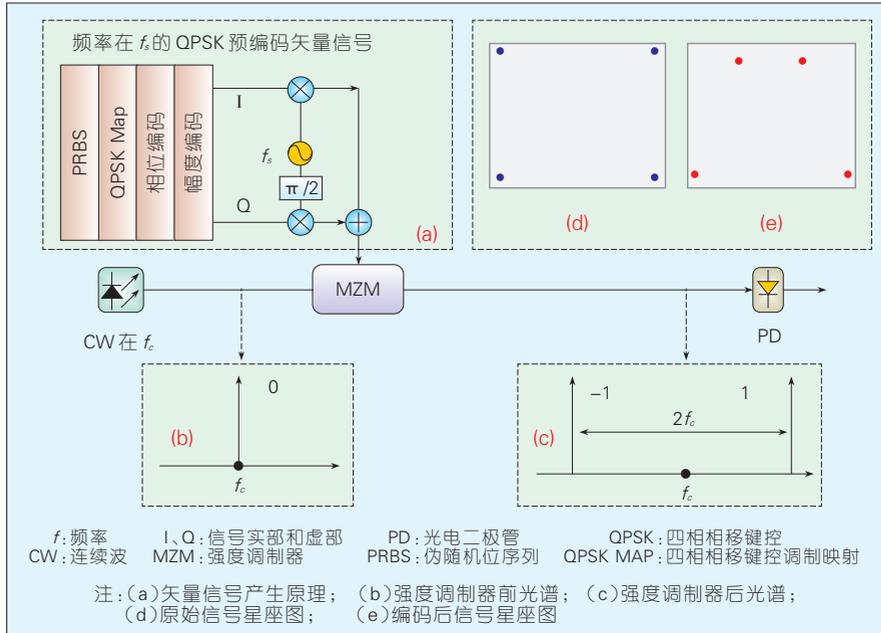
本系统为基于载波抑制方法产

生QPSK矢量信号,QPSK矢量信号产生原理过程如图1所示。该系统选取2个1边带作为载波。首先发送端QPSK信号经过相位预编码,然后上变频到 f_s ,QPSK矢量信号产生如图1(a)所示,QPSK矢量信号相位预编码过程中预编码前后对应的星座图分别为图1(d)和(c)所示,MZM前后光谱示意图如图1(b)和(c)所示。

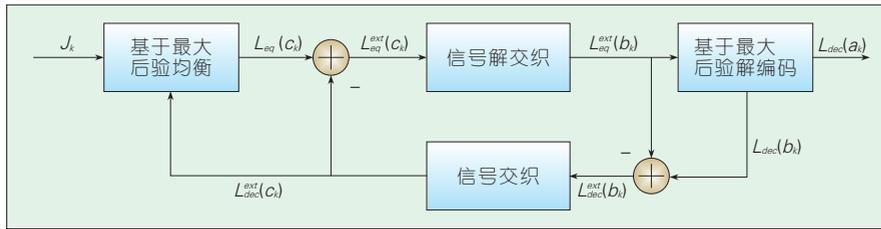
1.2 Turbo均衡原理

Turbo迭代均衡技术把Turbo编译码技术和信道均衡技术结合起来,通过多次迭代,在均衡器和译码器之间充分交换外信息来获得系统性能的提高,用来提高传输系统性能,通过采用合适的均衡技术降低Turbo迭代均衡技术的复杂度。Turbo迭代均衡技术由均衡器和译码器组成,均衡器和译码器通过迭代方式进行工作。均衡器和译码器使用软输入软输出方式,首先对输入的信号处经均衡器后得到信息的软输出,经解映射和相应的处理得到信号的外信息,该信息经解交织后,得到均衡技术中译码器需要的先验信息,译码器利用解交织后的先验信息计算软输出的外部信息,经交织器后,又可以得到均衡器的先验信息。而且均衡器可再次利用先验信息和接收信号进行相应的处理又能获取外部信息,这样进行新的迭代处理。经过几次迭代处理后,系统性能基本稳定,从译码器判决输出信号结果。Turbo迭代均衡分为基于最大后验(MAP)均衡和基于最小均方误差(LMMSE)均衡等,图2为基于MAP技术的Turbo均衡。

在均衡技术的MAP均衡部分,MAP均衡器通过接收信号和利用先验信息,得到本次码元的似然比 $L^k(x_n)$, $L^k(x_n)$ 经过解交织后进入MAP译码器,MAP译码器输出 $L^D(u_n)$, $L^D(u_n)$ 是由外部信息和内部信息构成,其中外部信息是在译码处理中由当前时刻以外的接收码元中得到,通过减去输入 $L^k(c_n)$ 得到:



▲图1 QPSK 矢量信号产生原理



▲图2 基于MAP均衡系统原理

$$L_e^E(x_n) = L^E(c_n) - L_e^E(x_n) \quad (5)$$

MAP译码器的外部信息经过交织后又作为先验信息反馈到MAP均衡器,MAP均衡器利用此先验信息再次进行均衡处理,但输出似然比比上一次均衡得到的似然比更准确,这样经过几次迭代均衡和译码处理,系统误码性能会改善很多。MAP译码器输出码元的后验LLR为:

$$L^D(c_n) = \ln \frac{p(c_n = +1|L^D(c))}{p(c_n = -1|L^D(c))} = \ln \frac{p(L^E(c)|c_n = +1)}{p(L^E(c)|c_n = -1)} + \ln \frac{\Pr(c_n = +1)}{\Pr(c_n = -1)} = L_e^D(c_n) + L_a^D(c_n) \quad (6)$$

MAP译码器根据接收的软输入信息,对发射信号进行解码得到:

$$u_i = \arg \min p\{u_i = u|L^D(c_n)\} \quad (7)$$

MAP均衡器和MAP译码器交换外部信息,将得到的外部信息作为先验信息,图2中Π(i)为交织功能,并且满足:

$$L_a^E(x_n) = L_e^D(x_n) = \Pi(L_e^D(x_n)) \quad (8)$$

而Π⁻¹(i)为解交织功能,且满足:

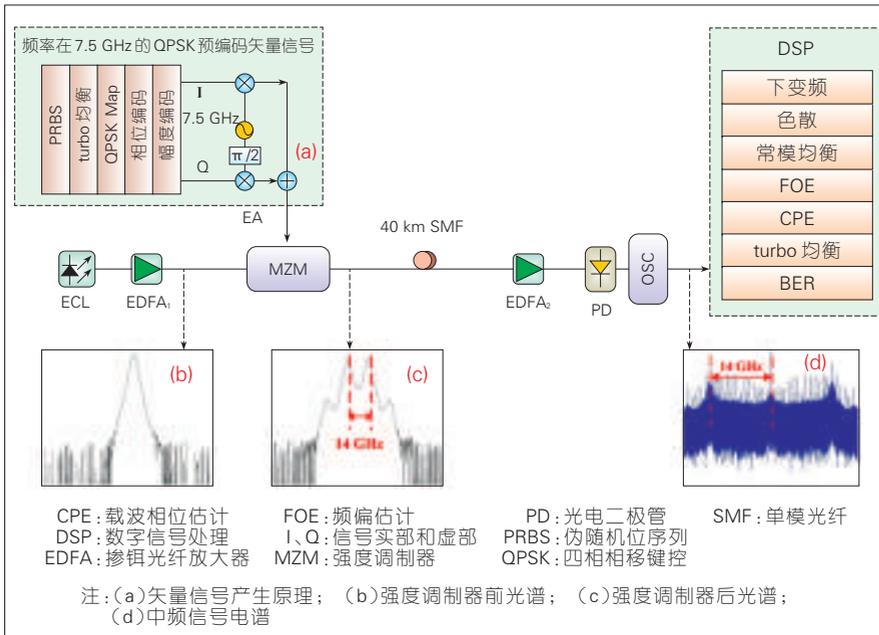
$$L_a^D(c_n) = L_e^E(c_n) = \Pi^{-1}(L_e^E(c_n)) \quad (9)$$

2 实验结果和分析

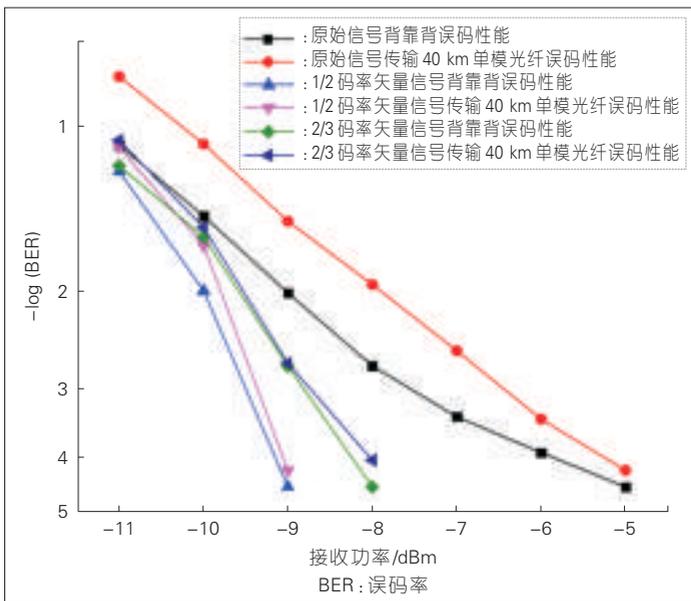
为了验证上述所示的QPSK矢量信号产生方法,我们通过载波抑制技术实验验证这个原理。图3为实验结构图,外部腔式激光器(ECL)波长为1563.684 nm,输出功率为13.98 dBm,经过EDFA放大后输出功率为19.98 dBm。任意波形发生器(AWG)输出的经过预编码频率在7 GHz的

矢量QPSK射频信号,矢量QPSK的产生原理如图1(a)所示,伪随机码(PRBS)首先经过QPSK映射,Turbo编码,然后经过相位预编码,上变频得到频率为7 GHz的矢量QPSK信号。这个QPSK矢量信号产生是离线通过Matlab形成。AWG输出的矢量QPSK信号经过带宽为10 GHz的放大器放大后调制到MZM上得到光矢量QPSK信号。AWG的采样率为24 GSample/s, QPSK发送速率为1 Gbaud。MZM具有2.7 V半波电压,-3 dB带宽为30 GHz和5 dBm插入损耗,MZM偏置电压设置为最小点,这样产生载波抑制,我们选择2个1阶边带作为载波,这样得到14 GHz的载波。MZM前后光谱分别如图3(b)和3(c)所示,光谱图3(b)和3(c)的分辨率为0.02 nm。光谱图3(c)两个1阶边带的间隔为14 GHz。2个1阶边带比其他边带高20 dB左右。经过40 km的单模光纤(SMF-28),再通过3 dB带宽为60 GHz的光电二极管(PD)接收,把光矢量QPSK信号转换为规则的QPSK信号。PD转换后的电谱图如图3(d)所示。然后通过3 dB带宽为16 GHz,采样率为40 GSample/s的力科示波器进行采集信号。这些采集的信号经过离线DSP处理,DSP处理过程包括信号下变频,色散补偿,信号重采样,CMA均衡,残余频偏估计,相位纠正,差分译码,Turbo均衡译码等过程。Turbo均衡采用基于MAP均衡,随机交织方式和8次迭代处理过程。

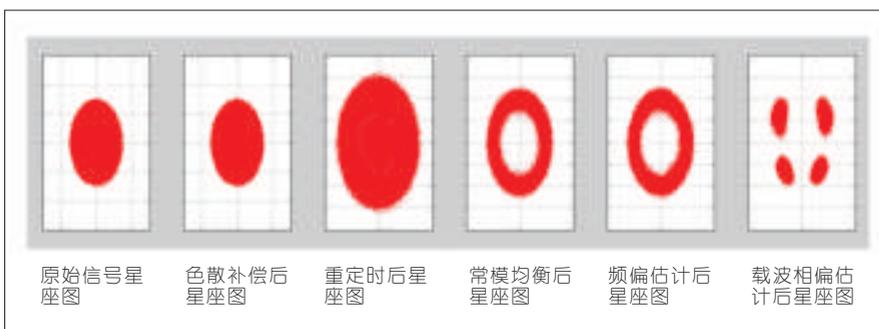
图4为接收光功率对应的误码性能曲线图。从图4可以看出,在BTB和40 km SMF传输后,码率为1/2的Turbo均衡QPSK信号误码性能最好,原始的QPSK误码性能最差。当误码率(BER)为10⁻⁴时,1/2和2/3码率的Turbo均衡QPSK信号的接收机灵敏度比原始QPSK信号分别提高了4 dB和3 dB。实验结果说明,Turbo均衡技术能提高光矢量信号传输系统和降低光纤链路色散的影响,具有较强



▲ 图3 基于Turbo均衡技术的QPSK矢量信号传输系统



▲ 图4 误码性能



▲ 图5 DSP处理过程中对应的星座图

的纠错能力。而且该系统产生 QPSK 矢量信号结构简单, Turbo 均衡技术算法复杂度低, 为以后光传输系统发展的方向之一。

图 5 为传输 40 km SMF 后, 在接收光功率为 -4 dBm 时, QPSK 信号 DSP 处理过程中不同处理过程对应的星座图。主要包括 CD 补偿, 信号重定时, CMA 均衡, 残余频偏估计和相位恢复等处理过程。

3 结束语

本文提出了基于载波抑制技术产生 QPSK 矢量信号, QPSK 矢量信号通过预编码后上变频得到 QPSK 矢量射频信号, 然后通过 MZM 调制得到光矢量信号, 通过载波抑制选取 2 个 1 阶边带作为载波, 利用光电二极管的平方律规则得到规则的 QPSK 信号。该方法只是用一个 MZM 调制器, 结构简单。而且该传输系统使用 Turbo 均衡技术降低光传输系统色散影响, 提高光传输系统的误码性能和降低算法复杂度。通过实验验证了 1 Gbaud 速率 QPSK 矢量信号通过码率分别为 1/2 和 2/3 的 Turbo 均衡方法后, 系统误码性能提高了不少, 说明该技术具有可行性。

参考文献

- [1] ZHANG J, YU J, CHI N, LI F, LI X. Experimental demonstration of 24-Gb/s CAP-64QAM radio-over-fiber system over 40-GHz mm-wave fiber-wireless transmission [J]. Optics Express, 2013: 26888-26895
- [2] ZHANG J, YU J, CHI N, DONG Z, LI X, CHANG G.. Multi-channel 120-Gb/s data transmission over 2x2 MIMO fiber-wireless link at W-Band [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2013, 25(8): 780-783
- [3] FANG Y, YU J, ZHANG J, XIAO J. Full-duplex bidirectional transmission of 10-Gb/s millimeter-wave QPSK signal in E-band optical wireless link [C]//Proceedings of the OFC, 2014: M2d7

- [4] LI X, YU J, CAO Z, ZHANG J, LI F, CHANG G K. Ultra-High-Speed Fiber-Wireless-Fiber Link for Emergency Communication System [C]//Proceedings of the OFC, 2014: OM3D.6
- [5] LI X, YU J, ZHANG J, DONG Z, CHI N. Doubling transmission capacity in optical wireless system by antenna horizontal- and vertical-polarization multiplexing [J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2125-2127
- [6] LI X, YU J, ZHANG J, LI F, XU Y, ZHANG Z, XIAO J. Fiber-wireless-fiber link for 100-Gb/s PDM-QPSK signal transmission at W-band [J]. Photon. Technol. Lett. 2014, 26(18): 1825-1828
- [7] LI X, YU J, XIAO J, XU Y. Fiber-wireless-fiber link for 128-Gb/s PDM-16QAM signal transmission at W-band [J]. Photon. Technol. Lett. 2014, 26(19): 1948-1951
- [8] LI F, CAO Z, LI X, DONG Z, CHEN L. Fiber-Wireless Transmission System of PDM-MIMO-OFDM at 100 GHz Frequency [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2394-2399
- [9] XU Y, ZHANG Z, LI X, XIAO J, YU J. Demonstration of 60 Gb/s W-Band Optical mm-wave Signal Full-Duplex Transmission Over Fiber-Wireless-Fiber Network [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(12): 2105-2108
- [10] LI X, YU J, XIAO J, XU Y. Fiber-Wireless-Fiber Link for 128-Gb/s PDM-16QAM Signal Transmission at (W) -Band [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. 2014, 26(19): 1948-1951
- [11] YU J, LI X, ZHANG J, XIAO J. 432-Gb/s PDM-16QAM signal wireless delivery at W-band using optical and antenna polarization multiplexing [C]//Proceedings of the ECOC 2014, Cannes, France, We.3.6.6
- [12] YU J, JIA Z, YI L, SU Y, CHANG G K, WANG T. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(1): 265-267
- [13] WANG X, YU J, CAO Z, XIAO J, CHEN L. SSBI Mitigation at 60GHz OFDM-ROF System Based on Optimization of Training Sequence [J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8839-8846
- [14] CHEN L, YU J G, WEN S, LU J, DONG Z, HUANG M, CHANG G K. A Novel Scheme for Seamless Integration of ROF With Centralized Lightwave OFDM-WDM-PON System [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(4): 2786-2791
- [15] CAO Z, YU J, XIA M, TANG Q, GAO Y. Reduction of Intersubcarrier Interference and Frequency-Selective Fading in OFDM-ROF Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(16): 2423-2429
- [16] LIN C T, SHIH P T, JIANG W J, WONG E Z, CHEN J J, CHI S. Photonic vector signal generation at microwave/millimeter-wave bands employing an optical frequency quadrupling scheme [J]. Opt. Lett., 2009, 34(14): 2171-2173

作者简介



肖江南, 复旦大学通信科学与工程系博士后; 主要研究领域为高速光纤通信、光纤无线传输系统、光信号处理、光信号编码技术等; 已发表学术论文 40 余篇。



余建军, 复旦大学通信科学与工程系教授、博导, 美国光学学会会士 (OSA Fellow), 先后入选国家教育部“长江特聘教授”、国家“千人计划”、“国家杰出青年”; 长期从事高速光纤通信前沿的研究和教学工作; 已发表学术论文 400 余篇。



迟楠, 复旦大学通信科学与工程系教授、博导, 2007 年亚太光通信会议 (APOC 2007) OSRT 国际研讨会和 ACP 2010 国际会议组委会主席, APOC 08、ICAIT09、ACP 2011、WOCC 2012、ACP 2013 技术委员会委员; 主要研究领域为可见光通信、相干光传输和光标记交换; 已发表学术论文 260 余篇, 被特邀国际会议报告 15 次。

综合信息

2019 年全球宽带接入市场将达 120 亿美元

根据 Dell'Oro 预测, 全球宽带接入市场, 包括 PON、DSL 和 Cable, 到 2019 年预计将达到 120 亿美元, 届时 PON 市场将占到总宽带接入市场的一半。

“预测期间, 我们预计 Cable 和 PON 市场将持续增长, 同时 DSL 市场会萎缩。Cable 市场的增长主要受 DOCSIS 3.1 升级的驱动, 而 PON 市场的强劲需求则来自中国的服务供应商。除中国外, 我们预计未来其他国家的服务供应商也将显著提高对 PON 技术的消费,” Dell'Oro 高级分析师 Alam Tamboli 表示。

“下一代 PON 技术也将推动 PON 市场需求, TWDM-PON 将有可能用在包括移动回程和企业服务等家庭宽带以外的应用场景,” Tamboli 表示。“设备商们正努力解决从第 1 代到第 2 代的 PON 技术升级路径, 以确保安装的基础设施在未来仍然可用,” 他补充道。

GSA: 全球已经推出 422 张 LTE 商用网络

全球移动设备供应商协会 (GSA) 于 2015 年 7 月 21 日发布了最新的关于 LTE 发展情况的报告。报告中的

统计数据显示, 181 个国家的 677 家运营商正在进行 LTE 投资。截至目前, 全球 143 个国家的 422 家运营商推出了 LTE 商用网络。仅在 2014 年一年, 就有 106 家运营商推出了 LTE 商用服务。

LTE-A 也在全球迅速普及。GSA 表示, 超过 30% 的 LTE 运营商已经开始 LTE-A 投资, 其中 45 个国家的 88 家运营商已经推出了 LTE-A 的商用服务。其中 37 个 LTE-A 网络速率最高达到 300 Mbit/s, 一些运营商还在测试 LTE-A Cat 9 网络, 峰值速率能够达到 450 Mbit/s。

1800 MHz 仍是 LTE 网络部署应用最多的频段, 有 89 个国家的 187 张商用 LTE 网络选择在这一频段部署。选择在 2.6 GHz 和 800 MHz 频段上部署的 LTE 网络则分别为 100 张和 91 张。

GSA 的数据还显示, 49 个国家的 103 家运营商正在投资于 VoLTE 的部署、测试和研究。目前已在 16 个国家推出了 25 个商用案例。GSA 表示, TD-LTE 标准也正在被越来越广泛地采用。截至目前, 共有 35 个国家的 59 家运营商推出了 TDD 模式的 LTE 商用服务。

(转载自《中国信息产业网》)

软件定义网络中网络诊断的思考和探索

Network Debugging in Software-Defined Network

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0041-004

摘要: 提出一种轻量级的诊断平面,它利用 OpenFlow 协议中多流表的功能,将探针包注入网络,探针包经过各个网络设备后会携带相关的转发规则的信息。通过收集携带这些信息的探针包、利用一组类似于程序调试的诊断原语,能够快速检测数据平面转发的正确性和网络性能问题。认为主动诊断数据平面真实的转发行为会是 SDN 网络诊断的一个重要方向。

关键词: 网络诊断; 软件定义网络; 诊断平面

Abstract: We propose a lightweight network debugging plane leveraging multiple flow tables to send probe packets into the network. When traversing network devices, probe packets carry information about forwarding rules. By collecting those probes packets and using debug primitives similar to program debugging, we can determine the correctness and network performance of the data plane forwarding. Debug the forwarding behavior of data plane is an important direction of software-defined network (SDN) network debugging.

Key words: network debugging; SDN; debugging plane

赵宇粟/ZHAO Yusu
张鹏飞/ZHANG Pengfei
金耀辉/JIN Yaohui

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

- 网络故障非常普遍,网络诊断又很困难
- 软件定义网络能够满足全网级别的网络诊断需求
- 主动式地诊断相对于被动式有着资源消耗少、针对性强的特点

1 网络故障和网络诊断

一般来说,网络诊断针对的网络故障,只包括网络的连通性问题,即端到端是否可达,但在广义上还包括了网络的性能问题,比如网络延迟和带宽。虽然网络性能问题更多的是用户之间的竞争所造成的,但是错误的配置以及软硬件的故障也会导致网络性能的急剧下降,而且事实上很多用户会要求网络管理员去解决网络的性能问题^[1],因此网络诊断的对象不仅是网络的连通性问题,而且还应当包括网络的一些性能方面的问题。

一直以来,网络诊断都是非常困

难的工作。网络管理员每天都要处理各种原因导致的网络故障,比如错误的配置、链路或者器件的失效以及软硬件的故障等等。而目前,仅有的工具可用于网络诊断,包括 ping、traceroute 和 SNMP 等,这些工具功能简单,能够解决的问题有限,而面对特别是网络性能问题的时候,更是一筹莫展,网络管理员依然需要依靠自己丰富的经验去排查具体的故障原因。

1.1 网络故障的普遍性

文献[1]对 61 名网络管理员做了一份详尽的调查,得到了一些结论。

(1) 超过 50% 的人提到,经常发生的网络故障包括 3 类:端到端可达性的失效、网络延迟和吞吐问题以及间歇性的连接问题。即既存在连通

性方面的问题,也存在着网络性能方面的问题。

(2) 超过 40% 的人提到,经常性的故障原因在于交换机/路由器的软件故障和硬件失效。

(3) 超过 80% 的人经常使用 ping 和 traceroute,超过 60% 的人经常使用 SNMP。

(4) 35% 的网络管理员每月收到超过 100 起网络故障的通告。

(5) 解决每一起网络故障的平均时间中,31.6% 的人需要半个小时至一个小时,而 24.6% 的人需要超过一个小时的时间。

由此可见,网络管理员面对的网络故障种类繁多、原因复杂,而且遇到的次数和花费的时间都很巨大,但是可用的工具却十分有限。因此,网络管理员急需更为强大的网络诊断

收稿日期: 2015-05-10
网络出版时间: 2015-07-08
基金项目: 国家自然科学基金(61371084)

工具。

1.2 网络诊断的困难性

结合上文的分析,在传统网络中,网络诊断比较困难的原因是多方面的:

(1) 表征网络的各种状态参数分散在各个网络设备上,在传统的网络中,通常需要管理员亲自登陆这样一些设备,才能获得相关的网络状态参数,同时这些状态参数是会经常变化的,这导致了要想准确地捕捉网络相关状态,就要不停地去监测整个网络的情况。

(2) 导致网络故障的原因很多,除了人为的配置错误外,各种网络设备都有可能失效或者发生硬件的故障。

(3) 网络规模不断扩大,网络拓扑更加复杂,可能失效的网络设备和链路也不断增多,文献[2]就提到在其观测的数据中心内部(规模没有具体说明,但是可以看到有1.3万条链路,因此规模不算大),每天平均都含有40.8次的链路失效以及5.2次的器件失效。

(4) 可用工具的缺乏导致网络故障不容易定位,并且故障原因不容易查明。

1.3 SDN 给网络诊断带来的机遇和挑战

软件定义网络(SDN)将传统网络中分布式的控制平面剥离了出来,放到了逻辑上集中式的控制器中,这使得网络状态可以直接通过对话控制器而获得;而由于其可编程的特性,我们可以轻松地实现对所有网络设备的统一管理,同时还可以根据自身的需求,开发一些新的功能,比如网络诊断。

然而SDN还处于发展的初期,目前也仅仅只有一种广泛应用的实现(OpenFlow^[3]),而控制器的性能不足问题以及网络设备的兼容问题导致了还没有真正商用的SDN环境。同

时,针对SDN的研究和应用还处于活跃的上期,暂时还没有成熟的技术去支撑类似传统网络中的各种网络应用,因此也没有很多针对SDN的网络诊断工具。

2 SDN 中网络诊断的研究现状

2.1 网络诊断的形式化描述

如图1所示,在应用层的各种网络策略(NP)通过编译器(C)编译成可被网络设备执行的预期网络状态(ENS),而ENS通过网络设备的执行(SE),生成真实的网络状态(ANS),

ANS还受到真实的网络拓扑(T)的制约。则有:

$$NP \xrightarrow{C} ENS \xrightarrow{SE} ANS$$

网络故障的最终体现是ANS有错误,若往前推则有以下3种类型的故障:

(1) SE有错误,即网络设备的硬件故障。

(2) T有错误,即链路或器件的失效。

(3) ENS有错误,即配置错误。

需要指出的是,一般都可以假定C是正确的,因此NP有错误等价于ENS有错误,即针对应用层的网络诊断等价于针对控制平面的网络诊断。则在SDN环境下,网络诊断的层面可分为两种:针对控制平面的和针对数据平面的。

对数据平面的。

2.2 控制平面的网络诊断

逻辑上集中式的控制平面给网络管理带来了方便,也增加了故障的可能性:所有的网络应用都有操作转发状态的权利,如果一个网络应用要求某一数据包转发到端口A,而另一应用要求转发到端口B,那么就有可能发生错误。因此有必要对控制平面的所有策略进行评估。

文献[4]-[5]提出了包头字段分析(HSA)的方法,将数据包处理的过程抽象成同协议无关的几何模型,即所有的网络设备都是针对输入数据包的转移函数,网络拓扑也同样抽象成一个转移函数。通过从指定数据源开始,计算端到端的可达性,从而可以发现网络中断的具体位置,为网络诊断提供了帮助。

文献[6]提出了一种高层次的编程语言,提供了针对分类和汇聚网络流量的声明式查询以及描述高层数据包转发策略的功能库,从而提高了网络编程代码的正确性和可重用性,类似的还有文献[7]。文献[8]提出了一种实时检测网络不变量的方法,它在控制器和网络设备之间增加了一层,每当有新的转发流表项要插入到网络设备时,该层都会去检查,看这条新的规则是否违反了某个网络不变量,从而在一定程度上避免了控制平面上多应用之间的矛盾所带来的

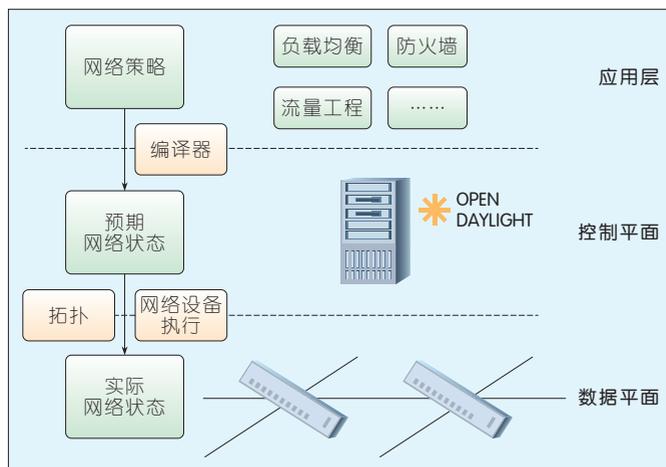


图1 网络状态的生成

网络问题。

然而针对控制平面的网络诊断通常假设控制平面的所有要求都能够被数据平面所执行,因此只需要检查控制平面是否存在错误就可以了。显然,这样的假设没有考虑到数据平面由于软硬件故障或是固件故障的存在,而导致的错误的转发行为;同时,网络中器件或是链路的失效也无法被控制平面的静态检测探查。

2.3 数据平面的网络诊断

文献[9]-[10]利用 OpenFlow 协议修改每一条流表项,使得途径交换机的每一个数据包都产生一个“明信片”,这个明信片中包含了该数据包所经的交换机 ID、出端口号和流表的版本号等信息,这样一些信息能够刻画出数据包在网络传输中途径每一跳的真实情况,反映了数据包的网络中的详细历史,在网络诊断时能够提供更为真实、详细的数据支持。虽然文章提到了使用压缩算法以及在交换机和主机端提供相应的数据压缩支持,但是每一个数据包产生一个明信片的代价依然很高。同时,局限于 OpenFlow1.0 协议,文章必须修改明信片中的目的多媒体接入控制(MAC)地址来输出相关信息,而如果数据包的目的 MAC 地址曾被修改过,该方法是无法发现的。

文献[11]提出在 SDN/OpenFlow 环境下,记录控制信道的所有网络流量和数据平面的所有网络流量,并强调在需要诊断网络时,将这些流量按照原有的顺序重放出来,就能够重现问题。同时,重放流量时,可以选择在一个隔离的试验环境中,这样可以排除生产环境中其他因素的干扰,为网络诊断和问题诊断提供了极大的方便。该方法需要额外的数据存储来储存相关的网络流量,当重放的数据量很大时,存储的开销也会相应提高,同时,仅仅将问题重现出来,并不能够直接找到造成网络故障的原因。

以上的两种方法属于被动监测的方式,通常需要很多额外的资源,比如带宽或者是存储,这样的方式虽然很全面,但是毫无疑问包含了很多无用的信息,这就造成了资源的浪费。因此,还有一些工作着眼于主动式的发送探针包,去针对数据平面进行网络诊断。

文献[1]通过对网络设备中所有规则的爬取,计算出能够触发所有规则的数据包的集合,然后周期性地在网络边缘的测试终端上发送这样一些数据包,去定位网络问题所发生的位置。这样的方式需要假设网络状态在较长的一段时间内是稳定不变的,因为计算数据包集合的时间很长,这对于类似数据中心这样的动态场景显然是不合适的。文章着重在于网络故障的定位,而对于故障原因的挖掘没有提供更有用的帮助。

文献[12]提出了 SDN 版本的 traceroute,该方法不局限在 IP 层,能够输出数据包在网络中的完整路径。局限于 OpenFlow1.0 协议,文章采用了染色算法去捕获相应的探针包,这在网络设备支持多流表的情况下是完全不需要的。

3 SDN 中的网络诊断平面

我们提出了网络诊断平面,它通

过主动的方式,利用 OpenFlow1.1+ 协议中的多流表的功能,实现了探针包的识别和捕获、流表项信息的输出和各种诊断原语,还能够实现:

(1) 主动式的探测数据平面的真实转发行为。

(2) 诊断网络连通性问题和网络性能问题。

(3) 提供程序调试器的原语,包括 breakpoint、backtrace、single-step 和 continue。

主动式网络诊断系统的整个架构如图 2 所示,以下是主要组成部分及其功能说明。

代理:检查控制器下发的流修改信息,在原始信息的后面添加额外的指令,用于网络诊断的探针包能够携带途径网络设备的 ID、匹配的流表、匹配的流表项等信息。

网络诊断器:根据管理员的诊断需求(测试网络可达性或是网络性能,不同的诊断原语)产生相关的探针包,并解析和分析收到的探针包,给出相应的结果。

监控端口:在网络设备端,专门用来收发探针包。该端口既可以是独占的,也可以是复用其他端口,在独占的情况下,能够更准确地去诊断网络的性能问题。

诊断信道:带外信道,可以复用

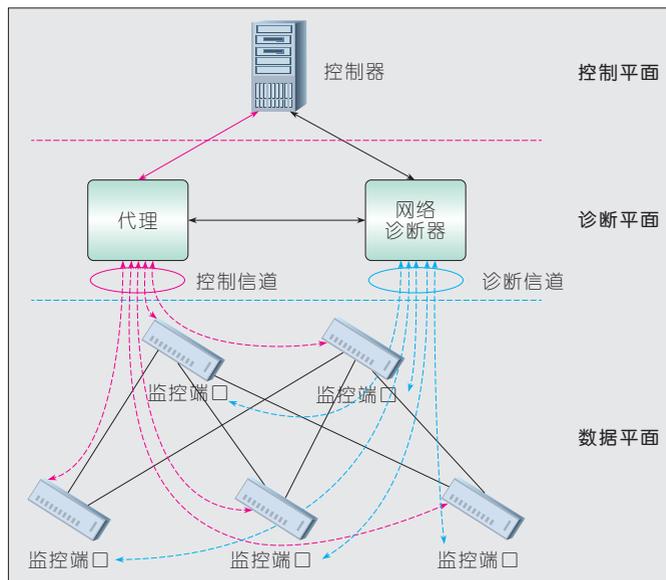
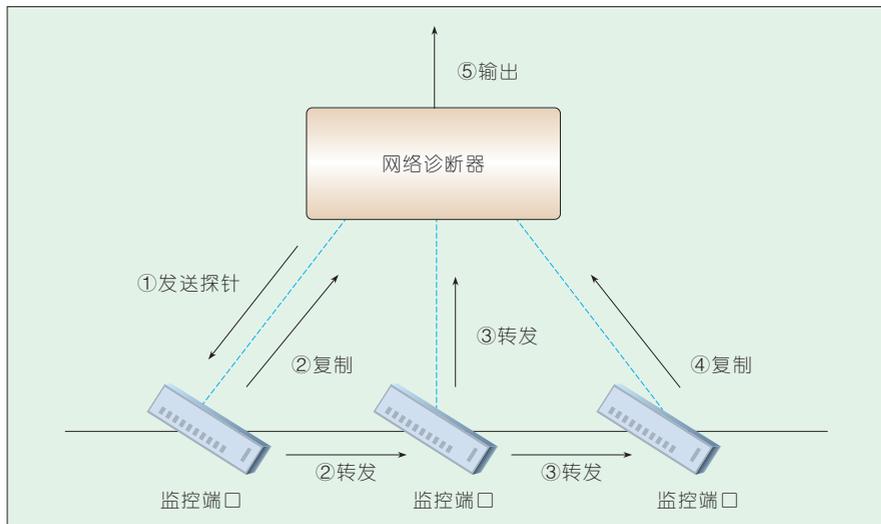


图2 主动式网络诊断系统架构



▲图3 网络诊断的流程

控制信道。

网络诊断的流程如图3所示。

(1)网络诊断器根据网络管理员的需求,生成相关的探针包,发往指定网络设备的监控端口。

(2)探针包像正常的数据包一样在该网络设备中去匹配流表,转发到相应的出端口后,复制一份数据包,经过多一级流表的处理,再通过监控端口发往网络诊断器。

(3)探针包到达下一个网络设备,重复步骤2。

(5)直到探针包到达主机端被丢弃,或者跳数达到上限(由于回路的原因,或者是诊断的需求,比如只转发三跳,到了某个交换机就不继续转发)。

(6)网络诊断器收集并解析所有的探针包后,给出路径信息以及每一跳所匹配过的流表项信息。

4 结束语

传统网络的诊断工具简单有限,对于网络状态无法及时获取,也没有全网的视角,面对各种可能导致网络问题的错误配置、链路和器件失效以及软硬件故障时,显得无能为力。软件定义网络的诞生,带来了控制平面和数据平面的分离,网络管理员可以通过逻辑上集中式的控制器快速地

获取所有的网络状态,得到整个网络的视角;而网络的可编程性使定制的网络诊断成为可能,加速了诊断的效率和准确性。在SDN环境下,针对控制平面和数据平面的网络诊断都有了一定的研究和发展,而主动式的诊断相对被动式有着资源消耗少、针对性强的特点,因此主动地去诊断数据平面真实的转发行为会是SDN网络诊断的一个重要方向。

参考文献

- [1] Zeng H, Kazemian P, Varghese G, et al. Automatic test packet generation[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, 2012: 241–252. doi: 10.1109/TNET.2013.2253121
- [2] Gill P, Jain N, and Nagappan N. Understanding Network Failures in Data Centers: Measurement, Analysis, and Implications [C]//ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(4): 350–361. doi: 10.1145/2018436.2018477
- [3] OpenFlow[EB/OL]// <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/openflow>
- [4] Kazemian P, Varghese G, and McKeown N. Header Space Analysis: Static Checking for Networks[C]//NSDI, 2012: 113–126
- [5] Kazemian P, Chan M, Zeng H, et al. Real Time Network Policy Checking Using Header Space Analysis[C]//NSDI, 2013: 99–111
- [6] Foster N, Harrison R, Freedman M J, et al. Frantic: A Network Programming Language [C]//ACM SIGPLAN Notices, 2011, 46(9): 279–291
- [7] Voellmy A, Agarwal A, Hudak P. Nettle: Functional Reactive programming for Openflow Networks[R]. USA: YALE

University New Haven CT Dept. of Computer Science, 2010

- [8] Khurshid A, Zhou W, Caesar M, et al. Veriflow: Verifying Network-Wide Invariants in Real Time [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 467–472
- [9] Handigol N, Heller B, Jeyakumar V, et al. Where is the Debugger for My Software-Defined Network?[C]//Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks, 2012: 55–60
- [10] Handigol N, Heller B, Jeyakumar V, et al. I know What Your Packet Did Last Hop: Using Packet Histories to Troubleshoot Networks[C]//Proc. USENIX NSDI, 2014
- [11] Wundsam A, Levin D, Seetharaman S, et al. OFRewind: Enabling Record and Replay Troubleshooting for Networks[C]//USENIX Annual Technical Conference, 2011
- [12] Agarwal K, Rozner E, Dixon C, et al. SDN Traceroute: Tracing SDN Forwarding Without Changing Network Behavior[C]// Proceedings of the Third Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, 2014: 145–150

作者简介



赵宇粟,上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读博士研究生;主要研究方向是软件定义网络以及网络监控。



张鹏飞,上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读博士研究生;主要研究方向是云计算、网络虚拟化和软件定义网络。



金耀辉,上海交通大学光纤通信国家重点实验室教授、网络信息中心副主任;研究方向为公众参与的开放创新、云计算网络架构和实时数据挖掘;先后负责和主研了“973”计划项目、国家“863”重点项目、自然科学基金重点项目和上海市以及国防项目等十余项;2007年获得上海市科技进步一等奖,2009年获教育部“新世纪优秀人才”计划;已发表论文120余篇。

网络功能虚拟化标准及技术探讨

Standard and Technology of Network Function Virtualization

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0045-006

摘要: 指出基于网络功能虚拟化(NFV)的核心网代表着信息发展的重要趋势, 中国在其标准化进展、架构及应用方面均取得显著进展。基于NFV的核心网需要解决一些关键问题才能进行部署, 包括标准化问题、可靠性问题、安全性问题、性能问题等。强调对于电信和IT融合的统一资源协同编排能力的建设、新型数据中心组网的云化网络体系架构的研究以及网络演进和创新对于运营商是极大的挑战。

关键词: NFV; 虚拟网络功能; 虚拟网管理编排(MANO); 叠加网络

Abstract: Network function virtualization (NFV) based core network is an important trend in information development, and China has made remarkable progress in its development, structure and application. The NFV-based core network has some key problems in standardization, reliability, security, and performance. Only when these problems are solved can it be deployed. The construction of unified resource collaborative arrangement on integration of telecommunication and IT, the research on the cloud based network architecture of new data center networking, and network evolution and innovation are all challenges for operators.

Key words: NFV; NFV function; NFV management and orchestration (MANO); overlay network

赵慧玲/ZHAO Huiling
解云鹏/XIE Yunpeng
胡晓娟/HU Xiaojuan

(中国电信股份有限公司北京研究院, 北京 100035)
(China Telecom Beijing Research Institute, Beijing 100035, China)

- 数据中心网络虚拟化方案无需依赖底层网络, 可实现多租户模式
- 数据中心成为构成电信网络的重要组成部分
- 网络虚拟化将会改变目前核心网的运维模式

网络功能虚拟化(NFV)的概念最早由欧洲电信标准化协会(ETSI)组织于2012年10月提出。它可以通过IT虚拟化技术, 利用标准化的通用IT设备来实现各种网络设备功能。

NFV的本质是实现硬件资源与软件功能的解耦, 其最终目标是通过标准的x86服务器、存储和交换设备, 来取代通信网中私有专用的网元。一方面, 基于x86标准的IT设备成本低廉, 能够为运营商节省巨大的投资成本; 另一方面, 开放的网络应用程序接口(API)能帮助运营商获得更多、更灵活的网络能力。通过软、硬件解耦及功能抽象, 可以使网络设

备功能不再依赖于专用硬件, 资源可以充分灵活共享, 由此实现新业务的快速开发和部署^[1]。

1 网络功能虚拟化标准进展

1.1 ETSI 网络功能虚拟化进展

2012年10月, 由AT&T、BT、Deutsche Telekom、Orange、Telefonica等7家运营商在ETSI发起成立了NFV行业规范工作组(NFV ISG), 该工作组致力于制订支持NFV的硬件和软件基础设施的要求和架构规范, 以及虚拟网络功能的指南, 并配合其他标准组织开展相关的工作, 根据情况对现有的虚拟化技术和相关标准进行整合^[2]。

NFV ISG旨在通过研究发展标准

IT虚拟化技术, 使得不同类型的网络设备能够融入到符合行业标准的大量服务器、交换机和存储设备中去, 具备特定功能的软件可以根据需要在网络中的不同位置硬件上安装和卸载, 不需要更换新的硬件设备。该技术可以为网络运营商及其客户带来如下好处:

- 减少设备的成本和能耗, 降低运营商的建设成本(CAPEX)和维护成本(OPEX)
- 缩短新网络业务部署和提供时间
- 提高新业务的投资利润率
- 向虚拟应用市场和纯软件新成员开放
- 为低风险开展创新业务的试验和部署创造机会

收稿日期: 2015-05-15
网络出版时间: 2015-07-10

2012年9月,会议决定选择ETSI的ISG作为NFV的工作母体。NFV ISG不是标准组织,但高于标准组织,主要负责制订电信设备NFV化的规范,而业界其他标准组织负责实现,包括协议制订与增强。

2012年10月,在德国Darmstadt举办的OpenFlow/软件定义网络(SDN)世界大会上发布了NFV第1版白皮书,描述了NFV的架构及其组成部分,分析了NFV的主要技术挑战。支持的运营商有13家:AT&T、BT、CenturyLink、CMCC、Colt、DT、KDDI、NTT、Orange、TI、Telefonica、Telstra、Verizon等。

2013年10月,ISG发布了第2版NFV白皮书(对应Frankfurt OpenFlow/SDN世界大会),报告了各工作组的研究进展。已有25家运营商加入了NFV阵营:AT&T、BT、CableLabs、CenturyLink、CMCC、CUCC、Colt、DT、DOCOMO、KDDI、KT、NTT、Protugue Telcom、SKT、Softbank、Sprint、Swisscom等。

2014年7月,在NFV第7次全会上,已经有37家运营商宣布加入NFV阵营。

2014年11月,ISG发布了第3版NFV白皮书,全面报告了各工作组的研究成果。NFV第8次全会总结NFV第1阶段的成绩(发布了8份GS文稿,11份文稿进入终稿并进行最后发布前的审核);启动NFV第2阶段工作,接受30个立项,成立演进和生态系统(EVE)、接口和架构(IFA)、测试、实施和开源(TST)、可靠性、可用性和保障性(REL)和安全(SEC)等工作组。

2013年NFV ISG主要聚焦于高级文档的设计,已经发布NFV的用例、需求、架构、术语、概念验证性等技术文档以及NFV白皮书1.0、2.0和3.0。目前NFV ISG的工作重心已经从最初的需求识别阶段进入到需求制订阶段,并且注重工作成果的可实现性以及实现的时效性。2014年上半年

NFV ISG的重点工作是概念验证(POC),希望通过提案、评估等环节向产业界征集能够满足NFV需求的产品或者原型,推动NFV产业发展。截至2014年底,已有30个概念验证的提议被接受。

2014世界移动通信大会(MWC)上OpenNFV宣布成立,HP担任主席位置。OpenNFV的主要思路是建立一套面向运营商的网络功能虚拟化解决方案,提供更加快速、简单、低价的服务。该组织将提供OpenNFV参考架构以及完整的架构生态系统,包括服务器、存储和网络、虚拟化、SDN控制器、资源管理、设计、分析、电信应用以及完整的运营支撑系统,以帮助运营商应对传统通信服务不断面临Whatsapp等移动软件应用冲击的局面。

1.2 CCSA网络功能虚拟化进展

中国通信标准化协会(CCSA)作为中国通信行业标准工作的主阵地,非常重视在网络及NFV方面的标准化工作,为中国的NFV研究和应用提供指导和服务。软件化和虚拟化目前已经成为未来网络演进发展的重要趋势和主要特征,两者相辅相成,相关的代表性技术和协议将会构成未来网络的基础。但目前未来网络的总体架构和相关技术的发展,整体上还处于研究的阶段,SDN和NFV等技术也仍处在探索和发展阶段^[9]。

目前,CCSA在中国主导着SDN/NFV标准化工作,并已经在多个TC开展了SDN/NFV的研究工作,主要涉及TC1、TC3、TC5、TC6等。

其中,在TC3下特设了软件虚拟化网络(SVN)研究组,目前重点聚焦对于基于SDN的智能管道技术和基于虚拟化的核心网的研究,一方面从网络架构上保持对全局的把握,另一方面从具体实现上找寻云化网络的落地点。目前,已经完成的一些标准项目有:

- 未来网络发展目标及关键技

术研究

- 基于SDN的智能型通信网络总体技术要求

- 核心网控制网元虚拟化技术研究

- 基于SDN的智能感知系统技术要求

目前在研的项目有:

- 基于SDN及NFV的IP多媒体子系统(IMS)网络技术要求

- 核心网控制网元虚拟化架构

- 核心网虚拟化架构下的信令流程

- 核心网控制网元虚拟化对物理服务器的需求研究

- 核心网控制网元虚拟化模板及模板语言研究

2015年新立的项目有:

- 基于SDN的智能型通信网络业务编排器研究

- 核心网网元虚拟化对电信级Hypervisor的需求

- 虚拟网管理编排(MANO)接口功能需求

2 网络功能虚拟化架构

NFV ISG在GS NFV 002中定义了NFV基础架构,如图1所示。

整个NFV架构可以分为3个主要部分:

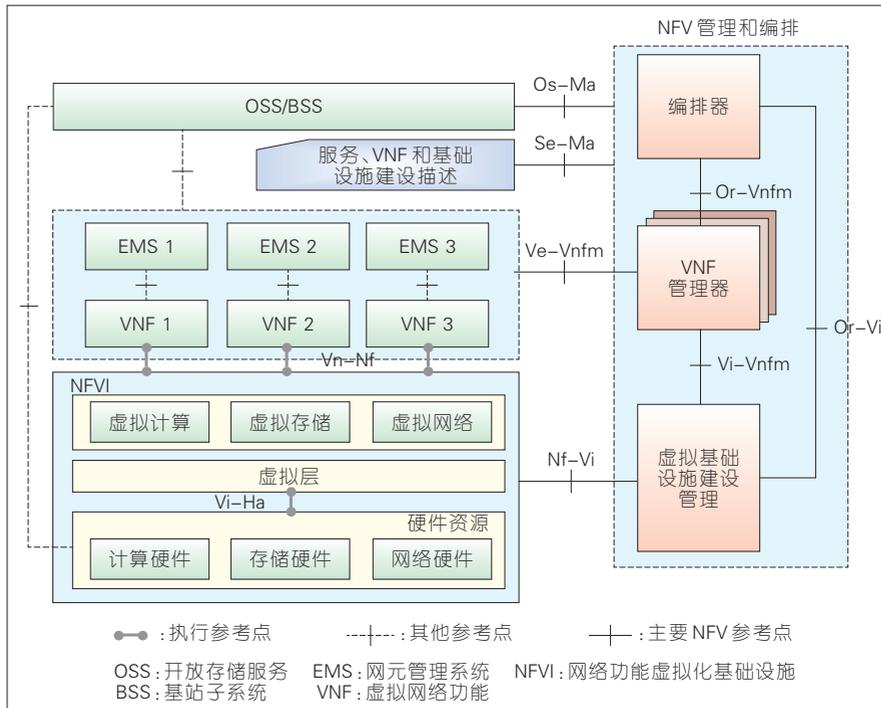
(1) NFV基础设施建设(NFVI)。NFV基础设施包括物理资源、虚拟化层及其上的虚拟资源,其中物理资源又包含计算、存储、网络3部分硬件资源,是承担着计算、存储和内外互连互通任务的设备。

(2) 虚拟网元与网管。虚拟网元与网管包括虚拟网络功能(VNF)与网元管理系统(EMS)。

- VNF。软件化后的网元,部署在虚拟机上,其功能与接口和非虚拟化时保持一致。

- EMS。EMS主要可以完成传统的网元管理功能及虚拟化环境下的新增功能。

(3) MANO。MANO包括编排器



▲图1 NfV典型架构

(Orchestrator)、虚拟网络功能管理器(VNFM)与虚拟基础设施管理器(VIM)。

- Orchestrator。负责网络业务、VNF与资源的总体管理,是整个NFV架构的控制核心。

- VNFM。负责VNF的资源及生命周期等相关管理,如网元的实例化、扩容与缩容等功能。

- VIM。可以实现对整个基础设施层资源(包含硬件资源和虚拟资源)的管理和监控。

此外还有开放存储服务(OSS)/基站子系统(BSS)网元,该网元除支持传统网络管理功能外,还支持在虚拟化环境下与Orchestrator交互,完成维护与管理功能。

硬件层的最底层为资源层,如计算硬件资源、存储硬件资源等。其上为虚拟化层,虚拟化层主要采用一些主流的虚拟化软件实现,如VMware、KVM、xen等。目前设备提供商一般采用优化上述虚拟化软件的方式构建虚拟化层^[4]。硬件层最上层为虚拟化后的计算单元、存储单元等。

虚拟化的网络功能层由各种VNF组成,每个VNF依据其运行的软件不同可实现不同的核心网网络逻辑功能。每个VNF有多个虚拟机(VM)组成,VM为虚拟化层已经虚拟化的计算资源、存储单元等,EMS为网元网管,OSS/BSS为目前运营商的支撑系统。EMS一般由VNF厂商提供,除传统的网管功能外,还包括虚拟化环境下的新增功能,如VNF资源的申请及运行数据的采集等。

虚拟化管理及协同层中包括Orchestrator、VNFM及VIM 3个功能单元。其中Orchestrator实现业务的编排,确定网络所需要部署的VNF数量、VNF类型及VNF拓扑等,同时它还生成VNFM的实例,并与VNFM交互,实现VNF的实例化及VNF的生命周期管理。VNFM主要负责VNF的容量规划并确定对VM的需求、负责VNF的生命周期的管理及与VIM交互申请VM资源等^[5]。VIM的主要功能是实现对整个基础设施层资源(包含硬件资源和虚拟资源)的管理和监控,如VM的监管及VM运行状态信

息的上报等。

3 网络功能虚拟化的典型应用

在市场竞争、业务运营以及建维成本等多方面因素的驱动下,运营商也在NFV方面积极研究和探索,并在一些已有明确业务需求的场景(如数据中心网络、移动核心网络、家庭网络等)中尝试引入。

3.1 数据中心网络虚拟化

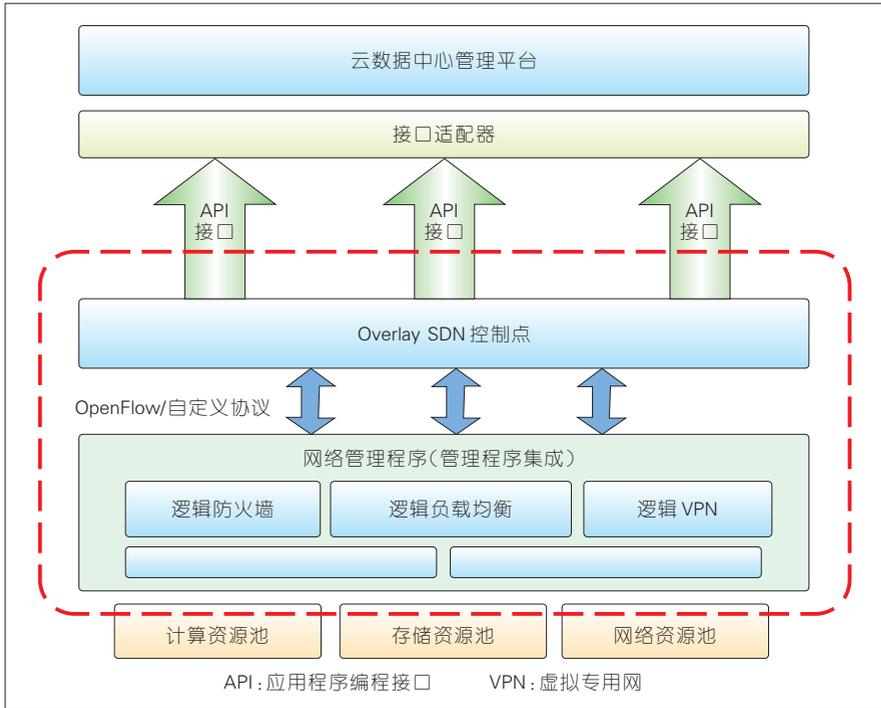
数据中心网络虚拟化可通过Overlay方式全面屏蔽底层物理网络设施,以软件方式实现底层物理网络的共享和租户隔离,实现针对每个租户的单独网络定义(组网、流量控制、安全管理等),云数据中心资源管理平台通过API接入SDN控制器,并通过可编程方式实现多租户网络的灵活部署(包括跨数据中心部署)。其应用场景如图2所示。

数据中心网络虚拟化方案无需依赖底层网络,可以灵活实现不同租户的安全、流量、性能等策略,实现多租户模式,基于可编程能力实现网络自动配置。但是引入Overlay后可能会使网络架构复杂化,并且物理网络无法感知逻辑网络,而通过软件控制逻辑网络也会对网络性能产生一定影响。

3.2 EPC网元虚拟化

对于NFV设备来说,由于目前运营商的使用场景相对明确(如核心网IP多媒体子系统(IMS)、虚拟演进分组核心(EPC)等),使得厂家的开发力度相对更快。以核心网虚拟化为例,多数厂家都提出了其设备研发的计划:到2015年实现商用设备的提供,而目前部分厂商甚至已经发布了商用的版本,并在某些运营商中得到了应用和部署^[6]。

核心网EPC网元虚拟化采用“应用+控制器+转换”的3层架构,将网元的流量流向、具体流量处理等控



▲图2 数据中心虚拟化场景

制功能提取出来并由“应用+控制器”两层来实现，“转换”层实现基于流的转发功能，并逐步实现控制面网元的集中化。同时，通过将SAE网关的信令面与MME、PCRF等设备相融合，形成移动核心网虚拟控制云。应用场景如图3所示。

EPC单网元虚拟化通过NFV实现网络硬件架构的统一，解决容量增

加带来的成本问题，通过业务控制和转发的分离以及硬件和软件的分离解决业务灵活部署和增强的问题，从而降低运营商的CAPEX和OPEX。

3.3 家庭网络虚拟化

家庭网络虚拟化是将家庭网络中的家庭网关(HG)、机顶盒(STB)设备中的控制面功能及业务处理功能

(如防火墙、地址管理、设备管理、故障诊断等)分离出来，虚拟化后迁移到控制器侧或云端，HG及STB设备上仅保留物理接入接口(广域网口、局域网口、USB接口等)以及数据面二层转发。应用场景如图4所示。

家庭网络虚拟化一方面可以简化用户侧设备，运营商不需要对STB和HG进行持续的维护和升级，只需通过远程方式即可为用户提供网络故障诊断服务，便于故障诊断和修复，提升业务可管理性并降低能耗；另一方面可以提高业务部署的灵活性，从而可以为未来新业务的快速部署提供能力，缩短了新业务市场的响应时间。

4 基于NFV的关键问题

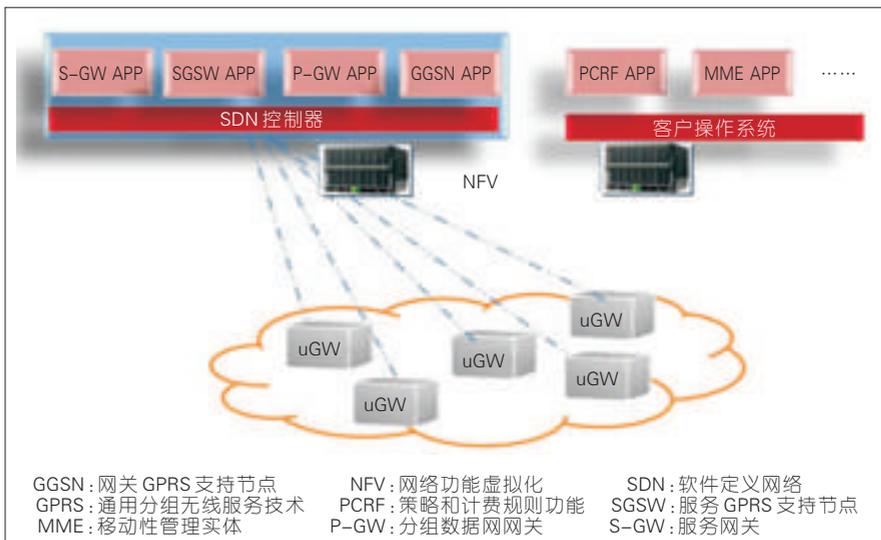
基于NFV的核心网需要解决一些关键问题，才能实际进行部署。如虚拟化核心网网络的标准化问题、可靠性问题、安全性问题、性能问题、网络资源调度及协调编排及运行维护方式的转变等。

4.1 标准化问题

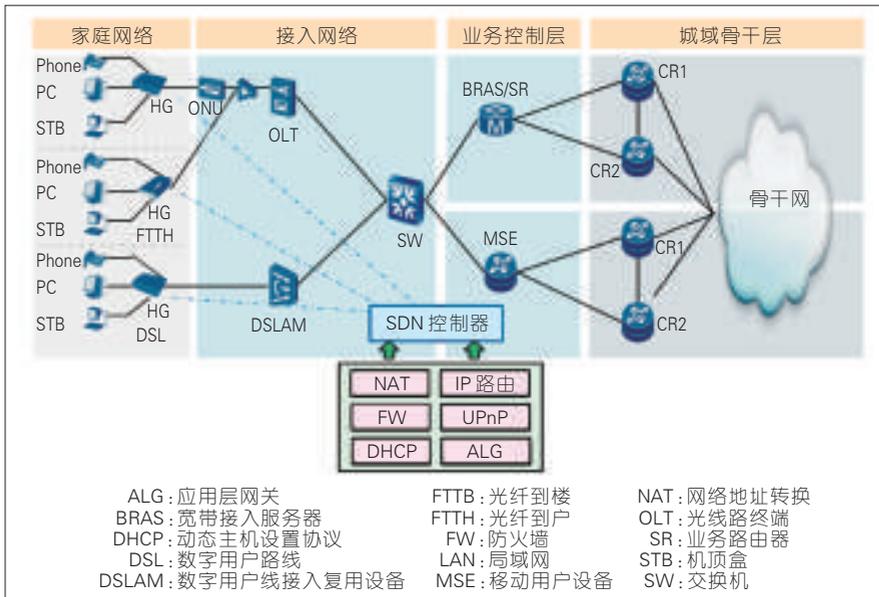
传统电信运营商提供的业务是构建在完善的标准基础上。采用NFV技术后由于硬件虚拟化技术的应用，传统电信网网络架构发生了实质性的变化。新架构产生了新的逻辑功能单元，如Orchestrator、VNFM、VIM等，而这些功能单元与VNF及VM之间均产生了新的接口。

在虚拟化的网络环境下，哪些接口需要进行标准化，哪些接口可以采用私有接口不进行开放，均需要明确并进行相关的标准化工作。在虚拟化的环境下，原有网络的逻辑网元间的接口及协议未发生变化，但原有的接口及网元的交换流程有可能发生变化，如EMS与OSS间将新增虚拟化相关的网管信息及设备运行维护的相关信息。

ETSI的NFV组织提出的框架、接口等需要与其他标准化组织接轨。



▲图3 核心网网元虚拟化场景



▲ 图4 家庭网络虚拟化场景

以核心网为例,第三代合作伙伴计划(3GPP)已经开始考虑NFV组织的架构,并率先在SA5上对虚拟化的核心网在网管、计费系统等方面开展标准化工作。同时,虚拟化架构对当前电信标准的影响分析还未完成,其中MANO是Gap分析的核心。

4.2 可靠性及安全性问题

传统电信运营商因监管等因素制约,电信网络及业务需要提供99.99999%的可靠性(即少于每年5 min的宕机时间)。而虚拟化后的核心网是否能提供类似目前传统电信设备的可靠性是核心网虚拟化需要研究的关键问题之一。

虚拟化的核心网硬件设备基于通用服务器。通用服务器与传统的电信硬件相比在可靠性方面有所下降,但随着通用服务器的发展,其可靠性也在日益提升。另外,在虚拟化的架构下,除了虚拟网元之间依旧保持原冗余备份外,虚拟化的网络资源可以实现分布式计算及分布式存储。当底层资源故障时,虚拟化网络可自动将计算任务转移到其他VM,或者从其他单元自动调用备份数据,从而提升系统的可靠性。同时,虚拟化的

控制层可更大范围地调用硬件资源,在异地容灾等一系列领域中提升系统的可靠性。

但IT云的可靠性算法不能达到电信云的可靠性指标,需要通过新的虚拟化环境下的可靠性算法及现网测试才能不断落实虚拟化网的可靠性问题。

至于安全性,目前采用的解决方案通过多级认证,保障资源使用的合法性,防止盗用及恶意接入。同时,采用虚拟资源隔离的方式避免虚拟应用间的互相影响,也可隔离不同用户,为政企客户等分配相对独立的资源及管理,提升安全性。但安全性的解决方案也在启动阶段,有待进一步验证。

4.3 性能问题

虚拟化核心网的性能问题,主要集中在内存读写上。

虚拟化增加了虚拟层,因而导致虚拟化核心网的性能受到影响,特别是对延迟敏感并有性能要求的用户面。性能下降主要由内存输入/输出端口(I/O)引起。虚拟模块主要为IT环境搭建,因此对于电信应用中更多的网络和数据业务流意味着更多的

缓存需求。

目前业界采用DPDK、SR-IOV等提升虚拟化核心网用户面的性能指标,也有设备提供商采用特定设计内存和IO读写算法来提升性能。

基于服务器的虚拟化核心网是否能满足大量数据业务、语音业务的用户面媒体转发的性能需求,也有待验证。

4.4 网络资源调度及协调编排问题

虚拟化的网络在网络规划、部署方面与目前传统电信网有较大的差异。目前核心网的规划是直接依据业务量线下测算网络容量、确定网络拓扑及网元数量。虚拟化核心网则自动依据业务量通过Orchestrator进行VNF规划,并落实到VM的规划。

虚拟化架构中业务编排模式需要进行研究,架构的管理、协调层中各个逻辑功能及其协调工作机制也均需要明晰。同时,虚拟化核心网中底层硬件资源、虚拟化网元功能、协调管理部分打破了同厂家提供的模式。另外,在网络集成等方面也需要进行研究,形成新的虚拟化核心网业务部署及资源调度、机制编排。由MANO实现业务编排、虚拟资源需求计算及申请,完成网络能力部署,使得现有业务部署的流程需要打破和革新,对现行的设备采购模式和运维模式都会产生较大的冲击^[7]。

4.5 运维方式的转变

网络虚拟化的研究,运维方式的转变也是我们需要注意的关键问题之一。虚拟化网颠覆了目前核心网设备中一种功能一种设备形态的模式。运维模式不再纵向划分,即不再划分为IMS网络维护或者EPC网络维护等,而是形成横向运维的模式,如硬件设备维护、软件设备维护及虚拟化网络资源编排维护等^[8]。

另外运维的范围也有所变化,目前的运维往往以省为单位进行的,但虚拟化的核心网可在更大范围内实

现统一控制,以便于资源更灵活调度。所以网络虚拟化将会改变目前核心网的运维模式。

上述运维方式的转变也是影响核心网虚拟化进程的关键因素之一。此外,数据中心成为构成电信网络的重要组成部分。虚拟化的电信网元如何在新型数据中心进行统一的配置和管理,由数据中心构成的云化网络体系应该如何形成都需要进行深入的研究。

5 结束语

以 SDN/NFV 为代表的核心云化网络代表着未来信息发展的重要趋势,网络软件化和虚拟化已经开始影响整个网络世界的格局。不论是在标准化、设备和产业化方面,还是在试验开发和应用部署方面,网络软件化和虚拟化都取得了重要的进展,成为业界公认的发展趋势。

但同时也需要指出,网络功能虚拟化的标准化工作目前还在不断发展中,相关技术标准尚不完善,还有待进一步深入研究。特别是对于电信和 IT 融合的统一资源协同编排能

力的建设、新型数据中心组网的云化网络体系架构的研究等,对于运营商来说都是极大的挑战,运营商需要不断增强软件能力的建设。只有产业链各方共同努力,不断研究和试验,并通过实践来完善和推进,借助市场来检验,SDN/NFV 技术才能在传统电信网络演进中起到关键的作用。

参考文献

- [1] Teemu K, Martin C, et al. Onix: a distributed control platform for large-scale production networks [C]//Proceedings of the 9th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation(OSDI '10), Oct 4-6, 2010, Vancouver, Canada, 2010:1-6
- [2] Network Function Virtualization [R]. Introductory White Paper. SDN and OpenFlow World Congress. October 22-24, 2012
- [3] RFC 2784. Generic Routing Encapsulation (GRE)[S]. IETF, 2000
- [4] RFC 2890.Key and Sequence Number Extensions to GRE[S].IETF, 2000
- [5] Vishwas Manral. Stateless Transport Tunneling (STT): Yet another cloud encapsulation or next-generation VxLAN? [EB/OL]. <http://h30507.www3.hp.com/t5/HP-Networking/Stateless-Transport-Tunneling-STT-Yet-another-cloud/ba-p/109559>
- [6] ETSI GS NFV 001 V1.1.1. Network Functions Virtualisation (NFV) Use Cases[S].ETSI, 2013-10
- [7] 王茜,解云鹏,陈运清,孙琼等.未来数据网络(FDN)的应用场景和需求[S].CCSA 行标,

2013

[8] 王茜,赵慧玲,解云鹏.SDN 标准化和应用场景探讨[J].中兴通讯技术, 2013,19(5), 06-09

作者简介



赵慧玲, 中国电信股份有限公司云计算研究中心主任、中国电信股份有限公司北京研究院副总、中国通信学会常务理事、信息通信网络技术专业委员会主任委员, 中国通信学会北京通信学会副理事长, 中国通信标准化协会网络与交换技术工作委员会主席, 国家“十二五”科技宽带网络重点专项和三网融合专项专家, MEF 董事会成员。



解云鹏, 中国电信股份有限公司北京研究院网络技术部网络架构与前沿技术研究室高级工程师; 主要研究领域为 SDN/NFV、未来网络等; 已获得省部级奖 1 项, 申请专利 4 项, 合著专著 2 本, 发表论文 10 余篇。



胡晓娟, 中国电信股份有限公司北京研究院高级工程师, 长期从事核心网技术及其标准的研究。

综合信息

2025 年全球 5G 收入将突破 650 亿美元

据国际媒体报道,市场研究机构 Juniper Research 公司日前在其最新公布的一项题为《5G 市场战略: 4G LTE 演进、频谱分析与 2015—2025 年机遇》报告中,对 5G 的采用前景做出了预测:到 2025 年,全球 5G 服务收入有望突破 650 亿美元,较其 2020 年正式投入商业运营第 1 年的 1 亿美元暴增,并将占到 2025 年运营商服务总收入的大约 7%。Juniper 指出,虽然首个商业部署预计将在 2020 年问世,但到 2025 年,5G 服务的采用就将非常普遍。

Juniper 这一的突破性研究发现:业内对于制订 5G 技术和性能标准的共识日渐高涨。“5G 愿景”所包含的一些关键元素有不低于 10 Gbit/s 的网络速度、等待时间在 1 ms 以下、频谱效率提高、能耗降低、电池寿命延长、元件密度更高,以及可靠性和灵活性的改进等。

Juniper 还发现,5G 不但能够实现速度更快的连接,还会促进广泛、全新的消费者和企业体验,包括数据密集型 and 节能型应用、自动驾驶汽车、先进的虚拟现实以及感官/触控互联网——进行持续地监测和控制。还应指出的是,运营商将需要充分考虑多种服务部署的方案,以便从其网络以及牌照投资中获得充足的投资回报。

该报告的作者尼廷·巴斯表示:“这些分散的领域或服务需要运营商在数据使用、设备类型和网络速度的基础上制订出透明且具有竞争力的价格,这意味着利润率将随着所参与的部门不同而变化。”

Juniper 估计,未来 5 年,业界将向 5G 技术的研究、试验和开发投入至少 250 亿美元。2020 年,全球主动 4G LTE 连接将超过 30 亿。

(转载自《中国信息产业网》)

ICT 融合趋势下的半导体技术和市场发展趋势

The Development Tendency of Semiconductor Technology and Marketing in ICT

王晓明/WANG Xiaoming

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

芯片被喻为国家的“工业粮食”，是所有整机设备的“心脏”，普遍应用于计算机、消费类电子、网络通信、汽车电子等几大领域，起着“生死攸关”的重要作用。2014年全球半导体市场规模达3 200亿美元，其中54%的芯片都出口到中国，但中国产芯片的市场份额只占10%。全球77%的手机是中国制造，但其中不到3%的手机芯片是中国产的。每年进口半导体需要消耗2 000多亿美元，超过了石油和其他大宗商品，是中国第一大进口商品。而且，中国芯片产业长期被其他国家厂商控制，直接制约了中国信息产业的发展。

研究数据表明，芯片产业1美元的产值，可以带动信息产业10美元的产值和100美元的国内生产总值(GDP)。世界各国纷纷将芯片作为国家重点战略产业来抓，美国、日本等发达国家通过大量的研发投入确保技术领先，韩国、新加坡和中国台湾通过积极的产业政策推动集成电路产业取得飞速发展。2014年，中国也正式提出把集成电路产业作为战略的发展方向，中国半导体迎来了腾

收稿日期: 2015-05-20
网络出版时间: 2015-07-16

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868(2015)04-0051-007

摘要: 认为 ICT 产业和半导体产业的发展交互影响: ICT 产业是中国半导体产业的核心市场方向, 而半导体产业的发展将推动 ICT 加速融合。ICT 产业浪潮将围绕下一代信息技术, 包括物联网、超高速宽带通信网络, 下一代移动通信(5G)、网络与信息安全等。根据 ICT 产业发展方向, 得出芯片架构软件定义化、低功率、封装技术先进化是半导体技术发展的主要趋势。认为中国半导体产业面临重大的机遇和挑战, 需要抓住新的产业机会, 实现更大发展。

关键词: 半导体; 集成电路; 信息通信技术; 芯片架构; 芯片封装

Abstract: The development of the ICT industry and the semiconductor industry mutually influences each other: ICT industry is the core of China's semiconductor industry, while the development of semiconductor industry will promote the integration of ICT. The development of ICT industry will focus on the next generation of information technology, including the Internet of Things, ultrahigh-speed broadband communication network, next-generation mobile communication (5G), and network and information security. Software-defined chip architecture, power efficiency, and advanced packaging technology are the main trends in semiconductor technology. We believe that China's semiconductor industry is facing great opportunities and challenges, and we need to seize the new opportunities and achieve greater development.

Keywords: semiconductor; integrated circuit; information and communication technology (ICT); chip architecture; chip package

飞的机遇。

1 半导体市场现状和发展趋势

自1947年贝尔研究室发明第1个三极管开始, 电子工业的不断创新, 推动了信息社会的蓬勃发展。1976年 Intel 创始人 Gordon Moore 预言: “集成芯片的晶体管数量大约每两年可以翻一倍, 伴随集成度提升的是性能的提高。”后来这被称为摩尔定律。如图1所示, 集成电路从晶体管(TTL), 经过 NMOS 到 CMOS, 由

1971年的10 μm工艺发展到2011年的28 nm, 历经了15代, 同时摩尔定律也经历了30多年实践的验证。可以预测在2020年左右, CMOS工艺会达到5 nm, 半导体即将进入后摩尔的时代^[1]。

半导体行业一直是现代科技的基础, 以集成电路(IC)为主的半导体产业也已经成为了全球经济的重要支柱行业之一。据 IBS 统计, 相比全球半导体市场规模的缓慢增长, 中国已经成为全球半导体增长最快的市场, 到2014年达到了全球市场的一



图1 半导体工艺演进

半以上,但是中国的IC设计业产值占全球市场的规模却不到1/5,如图2所示。中国IC设计业还有很大的发展空间,同时也需要面对更大的市场挑战。

根据赛迪市场分析,如图3所示,从2014年中国的半导体市场结构数据看到,半导体市场中与信息、通信和技术(ICT)直接相关(互联网、计算机和消费电子)的市场规模占比达到85%以上,因此ICT相关产业是中国半导体产业的核心市场方向。

2 ICT产业和技术发展趋势

随着个人计算机和通信网络这两次产业浪潮的发展,使平行于物理世界的数字虚拟世界初具规模,而随着IT和CT技术的进一步发展,尤其是在摩尔定律的推动下,所有的设备都慢慢地变得拥有计算能力,拥有联网能力,因此随着数字虚拟世界进一步的扩大和完善,虚拟世界与真实物理世界会有越来越多的连接,最终实现二者的融合。

自超大规模集成电路(VLSI)出现以来,它的快速发展就与整个电子信息产业发展密切相关,如图4所示。在20世纪90年代中期之前,IC的高速发展与IT产业浪潮相匹配,推动了以个人电脑为核心的IT设备的快速普及;接着,CT产业的高速发展继续推动IC的第二次高速发展,半导体的这次高速发展保证了以通信和互联网为核心的CT产业的高速发展,尤其是促进了互联网快速进入千家万户;而进入2010年以后,随着

ICT的融合,尤其是移动互联网的发展,基于移动通信网络(M-ICT)的新的产业浪潮将席卷而来,意味着半导体产业的发展即将迎来一轮新的发展高潮。

展高潮。

新的产业浪潮的发展趋势是网络移动化,网络无处不在、无时不在,同时万物互联。新的产业浪潮的发展是ICT的融合,是物联网与互联网的融合,它面对的是海量数据和信息的交流与处理,因此需要更高的通信带宽,更智能化的移动网络和终端,以及更安全的通信和信息,最终形成万物互联的智慧世界,更好地推动社会和经济的发展和进步。因此新的产业浪潮将围绕下一代信息技术,包括物联网(工业互联网)、超高速宽带通信网络,下一代移动通信(5G)、网

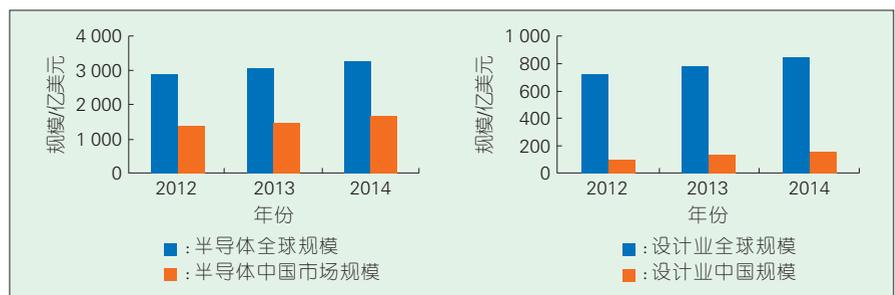


图2 全球和中国半导体市场规模对比

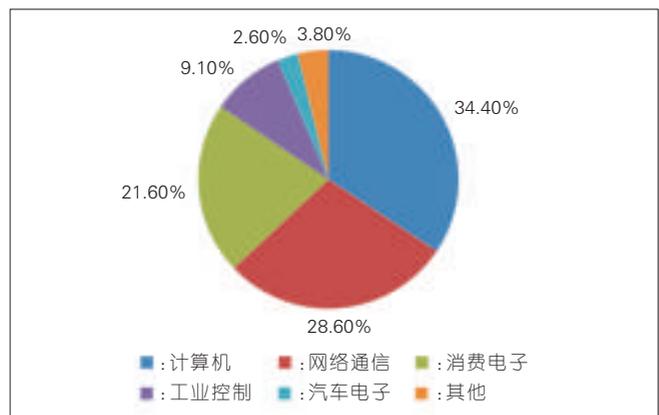


图3 2014年中国集成电路市场结构

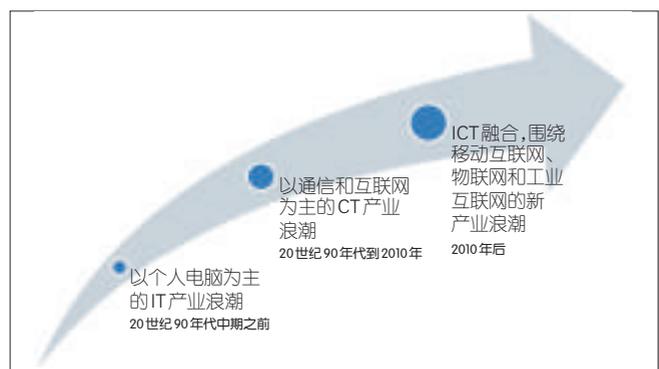


图4 半导体技术和产业的3次大发展

络与信息安全等。

2.1 物联网和工业互联网

物联网是利用局部网络或互联网等通信技术把传感器、控制器、机器、人员和物等通过新的方式联在一起,形成人与物、物与物相联,实现信息化、远程管理控制和智能化的网络。通过智能感知、识别技术与普适计算等通信感知技术,广泛应用于网络的融合中,也因此被称为继计算机、互联网之后信息产业发展的第3次浪潮。

物联网由终端、网络与通信、云计算和物联网应用组成。物联网应用主要包括探测感知、智能家居、智慧城市和工业互联网等几大类应用方向。

工业互联网是全球工业系统与高级计算、分析、感应技术以及互联网连接融合的结果^[9]。它通过智能机器间的连接并最终将人机连接,结合软件和大数据分析,重构全球工业、激发生产力,让世界更美好、更快速、更安全、更清洁且更经济。

“工业4.0”是德国联邦教研部与联邦经济技术部在2013年汉诺威工业博览会上提出的概念^[9]。它是指以信息物理融合系统(CPS)为基础,以生产高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第4次工业革命。

“工业4.0”或工业互联网本质上是互联网运动神经系统的萌芽,互联网中枢神经系统也就是云计算中的软件系统控制着工业企业的生产设备、家庭的家用设备、办公室的办公设备,通过智能化、3D打印、无线传感等技术使的机械设备成为互联网大脑改造世界的工具。同时这些智能制造和智能设备也源源不断地向互联网大脑反馈大数据,供互联网中枢神经系统决策使用。

物联网的核心技术包括感知和识别技术,如各类传感器、指纹识别等;通信和网络技术,如移动通信、Wi-Fi、宽带通信网络等;大数据处理

技术,针对海量数据的处理和挖掘,创造价值。

根据Gartner预测,未来10年,物联网将全面超过移动互联网和个人电脑,成为最大的半导体市场^[4]。

2.2 网络通信技术

软件定义网络(SDN)是一种新型网络创新架构,是网络虚拟化的一种实现方式,其核心技术OpenFlow通过将网络设备控制面与数据面分离开来,从而实现了网络流量的灵活控制,使网络作为管道变得更加智能。

SDN将网络的智能从硬件转移到软件,用户不需要更新已有的硬件设备就可以为网络增加新的功能。这样做简化和整合了控制功能,让网络硬件设备变得更可靠,还有助于降低设备购买和运营成本。控制平面和数据平面分离之后,厂商可以单独开发控制平面,并可以与ASIC、商业芯片或者服务器技术相集成。

第5代移动通信系统(5G)是3G和4G的延伸。3G和4G移动通信技术是互联网数据驱动的。那么5G是什么驱动的呢?互联网对更大容量数据的需求仍然是一个主要驱动力,特别在亚洲国家,极高的城市人口密度对网络容量构成了严重的挑战。同时基于物流网的智能电网、智能家居、智能城市等物与物间新型通信业务和数据服务不断涌现是推动5G出现的另一股动力。同时未来的5G网络要比现在的网络具有更高的能量效率。

现在暂时还无法给出5G的完整定义,但是一般公认5G要满足以下这些要求:

- 用户体验速度(非理论速度)要达到1~10 Gbit/s
- 端到端时延要达到1 ms级
- 设备连接数量增加10~100倍
- 能耗减低90%。

因此未来5G网络需要更高的网络带宽,更高的信息处理能力,更大的通信容量,更灵活的网络结构,以

及更低的系统能耗。这些都对5G系统和终端用的芯片也提出了更高的要求。

2.3 网络和信息安全

网络和信息安全是指网络系统的硬件、软件及其系统中的数据受到保护,不受偶然的或恶意的破坏、更改、泄露,系统能够连续可靠正常运行,网络和信息业务不中断,最终实现业务连续性。

网络和信息安全的目的是希望网络系统和系统中的数据实现可管、可控、可信。

随着“棱镜门”、“监听门”等事件的出现,暴露出中国在某些领域的核心技术的缺失,为中国信息安全领域的布局敲响了警钟。安全问题将成为未来网络的核心要素。随着国家信息安全的重要性被提升到战略高度,信息安全建设已经成为刻不容缓且必须大力投入的重点项目,从芯片级解决网络和信息安全问题已经成为共识,真正做到“自主可控”对网络信息安全有着更重要的意义。

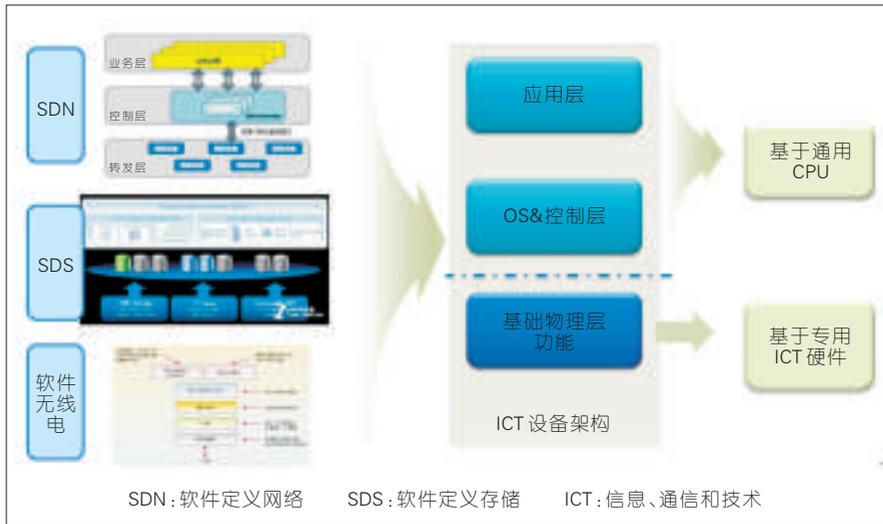
3 半导体技术发展趋势

前述的ICT的市场、产品和技术发展趋势,对半导体尤其是芯片设计提出了新的、更高的要求。芯片设计技术也需要不断发展来适应和支撑ICT产业的更快发展。半导体技术有着以下一些发展趋势。

3.1 软件定义化的芯片架构

ICT融合从SDN开始,并迅速呈现燎原之势。从SDN到软件定义存储(SDS),再到软件定义无线电(SDR),可以说ICT的融合就是对原有专用设备和专用通信网络的通用化,软件定义化的过程。如图5所示,ICT融合的最终结果使ICT融合的架构变成基础通信硬件/专用集成电路(ASIC)+通用CPU。

和可软件化的ICT产品架构类似,芯片的架构也越来越向可软件化



▲图5 软件定义化发展趋势

方向发展,目前软件可定义化的可重构的芯片架构正在成为主流。软件定义化的芯片架构本质上还是系统级芯片架构(SOC),如图6所示。

软件定义化的芯片架构主要组成部分包括处理器、片上互连、存储以及安全、通用的ICT功能模块和通用标准接口等。下面简单介绍这些部分的发展趋势。

- 处理器:处理器虚拟化能力将会进一步增强。

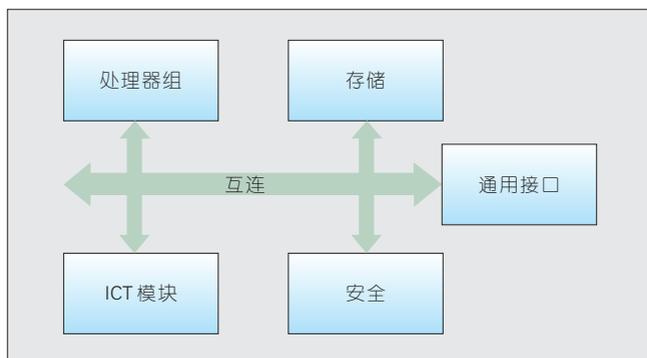
虚拟化是指在一个物理处理器上提供多种软件执行环境的技术。可在同一CPU上虚拟出安全和标准两种执行环境,未来安全和通用双操作系统会是产品安全解决方案趋势之一。虚拟监控程序是一种非中断方式实现工作负载迁移能力的超级管理程序,它在执行时,会给每一个虚拟机分配适量的CPU、内存等

资源,并加载所有虚拟机的客户操作系统,可真正实现多操作系统和应用共享同一套物理硬件,是虚拟化技术的核心。

- 互连:总线互连向网络互连(NOC)、一致性互连发展。

随着处理器核和外设数量的增加,系统各个设备间的互联变得越来越复杂,传统的总线matrix的结构已经不能满足性能、带宽的需求,正逐步向NoC网络结构发展。同时多核间的数据一致性维护也对互连提出了新的需求,内置一致性维护模块的互连网络可通过硬件方式保证各个节点间的数据一致性,同时还减少了由于数据一致性所需的额外存储的访问,从而可以为提高系统性能和降低系统功耗提供有力保障。

- 存储:集中存储向多通道存储发展。



◀图6 软件可定义化下的芯片架构

最新的双重数据比率(DDR 4)/低功率双重数据比率(LPDDR 4)速度可以超过3 200 Mbit/s。即使是这样的速度,以往的集中式存储方式,依然会引起DDR访问数据的阻塞,这种情况下,只能采用双通道DDR方式来提升存储带宽。双通道,就是芯片可以在两个相互独立的数据通道上分别寻址、读取数据,这在架构设计上不仅仅需要系统中有两个DDR控制器。通常情况下,系统还需要有相应的interleave机制,来对访问DDR的操作进行自动拆分,从而缓解单路DDR的带宽压力,有效提升系统性能。

- 安全:数据安全向环境安全不断发展。

信息安全日趋重要,软件定义化的架构越来越注重安全设计,安全已经不是普通意义上的数据加密,而是要构建安全的执行环境。软件定义化架构安全设计的趋势是支持安全可信执行环境(TEE)。通过系统架构上的硬件隔离、总线访问控制构建可信区域,在硬件可信区域上实现软件隔离和安全操作系统,在可信环境中管理敏感资产和密钥、执行关键应用,并集成高性能的加解密算法。

- 通用ICT功能模块:兼容通信功能,可软件定义。

通用ICT功能模块围绕着软件定义化的结构,更多的是突出基本的功能,通过软件定义来实现完整的系统功能。通用的ICT功能包括编解码、图像视频处理、信号处理等功能。它不一定是纯粹的ASIC硬件模块,也可能是具备一定专用功能的处理器,如图形处理器(GPU)、数字信号处理(DSP)等。

- 通用接口:向高速、高带宽的方向发展。

DDR 4、USB 3.0、10 G 以上 Serdes 接口在各种芯片中成为标配,一方面应用场景的复杂使得数据交互量越来越多,而且对数据传输的速度要求越来越高;同时半导体工艺的演进也

保证了有相应的技术来支撑数据交互加速的需求。

需要指出,芯片的架构设计已经从传统的经验设计演化到定量评估,从单一的硬件性能/功能设计推进到软硬件协同设计。此外低功耗设计也成为架构设计的重要组成。

3.2 低功耗技术

近年来,随着芯片先进工艺、高集成度、复杂 IP、先进 SOC 技术的发展,出现了各种采用低功耗技术的芯片。手机芯片“核战”此起彼伏,仅用两年时间就实现了从单核到八核芯片的跨越,处理器从 32 位走到 64 位;复杂的多媒体技术,经过不断发展,实现了高清显示和高清摄影,一次次刷新着眼球;物联网的火热发展,带动各种低功耗微控制单元(MCU)芯片及相关的应用层出不穷。纵观这些 SOC 芯片,低功耗技术在其中扮演了重要的角色,从表及内我们来看看低功耗技术的一些发展趋势。

• 低功耗的互联技术

为了实现低功耗的数据交互,各种标准化组织和公司提出了各种各样的通信技术。大家熟悉的蜂窝无线通信 2G/3G/4G/5G 技术,已经实现了从几 kbit/s 到几百 Mbit/s 的速率连接。现在大量涌现的 Bluetooth、Wi-Fi、Zigbee 技术,已经实现了更低功耗和更加便捷的互联互通。其他低功耗连接技术,也实现了民用、商用到工业使用的功能各异的万物互联需求。通过制订标准化的互联协议技术,规范产品接口,这些低功耗连接技术实现了各种不同功能的设备可以互联互通。这些低功耗连接技术,通过减少设备之间的信令交互,简化设备接入方式,减少设备连接在网的时间,延长设备睡眠的时间,通过这些方式减少设备的功耗。可以预见,低功耗互联技术和应用会有很大的发展。

• 低功耗实现技术

为了有效降低功耗,在芯片设计

中通常会使用时钟门控、多阈值设计、多电压设计、电源门控、动态频率调整(DFS)、动态电压频率调整(DVFS)、自适应电源调整(AVS)、低功耗 memory 技术。芯片动态功耗中,时钟树的动态功耗通常达到 40% 以上。时钟门控技术根据系统工作的情况,动态门控系统时钟,可以有效减少芯片的动态功耗。多阈值设计是指采用具有不同阈值门限的库单元,在满足时序要求的前提下,尽量降低电路的漏电功耗。通常的电路电压越高性能越好,采用多电压设计技术是为了在满足高速率电路性能的前提下,可以降低低频电路的电压,以此达到降低功耗的目地。电源门控技术,是根据电路的工作特性,当部分电路不需要工作时,关闭该部分电路的电源,降低电路的漏电功耗。DFS 设计,是根据系统的性能需求,软件动态调整电路的工作频率,降低电路的功耗。DVFS 设计,在 DFS 设计的基础上,软件根据系统性能需求,可以动态调整电路的工作频率和工作电压,以此达到降低动态功耗的要求。相比 DFS、DVFS 技术,AVS 技术更加智能、高效地降低功耗。AVS 技术可以自动检测芯片的性能,实现动态自适应调整芯片的工作电压。低功耗 memory 技术,是根据 memory 的工作状况,采用本体偏置的方式降低漏电功耗,或者采用多电源的设计降低 memory 的漏电功耗。这些低功耗实现技术,通过在芯片设计中的使用,能够有效地解决芯片设计中的功耗问题,被越来越多的设计所采用。

• 工艺的提升

随着芯片的工艺制程从 65 nm、40 nm 到 28 nm,再到 16 nm/14 nm,乃至 10 nm,每次工艺的更新都会有效地降低电路的尺寸和核心电压,减少电路的尺寸,伴随而来的是芯片功耗持续减少。TSMC、Intel、三星等 Foundry 厂商,正在不遗余力地加快更先进工艺的研发工作。虽然 28 nm

工艺刚刚普及,但是 16 nm 工艺已经开始实现量产,14 nm 以至于 10 nm 工艺都已经开始试产,7 nm 的工艺也已经开始研发。

• EDA 工具的支撑

为了支持低功耗设计实现,电子设计自动化(EDA)工具厂商提出了不同的解决方案。EDA 厂商在提供各自设计流程的同时,还在各自的硬件仿真器上支持低功耗功能。比如 Synopsys 的 Zebu 支持 UPF,可以在硬件仿真器上实现系统的低功耗设计,调试低功耗的软硬件功能;Cadence 的 PXP 支持 CPF,实现低功耗的验证和调试功能。

EDA 厂商在构建完整的低功耗设计流程后,方便 IC 设计者从系统设计、实现、验证、调试等不同层面实现低功耗的功能,加快了低功耗设计的实现进度,并且保证了低功耗设计的质量。

• 低功耗软硬件控制策略

随着低功耗功能的复杂化,如何有效地划分低功耗硬件和软件功能变得更加复杂。传统的低功耗实现,硬件占据主导地位,软件只需要实现简单的功能配置既可。随着 SOC 集成度的增加,各种不同系统功能集成到一颗芯片上,使得系统功耗的管理变得更加复杂。现在的 SOC 芯片,呈现出多核异构系统、多操作系统、应用模式、管理方式共存的局面,有效划分各个子系统功耗控制功能,划分软硬件的功能。以最小代价实现低功耗并且对功耗控制性能最佳的方式变得尤为重要。低功耗软硬件控制策略的实现,需要耗费大量的系统人员的精力,在不同的方案间进行取舍,设计出满足系统的最优方案。

• 低功耗的设计架构

为了实现更低的系统功耗,在架构设计初期就要考虑低功耗的需求。通常低功耗架构设计时,需要考虑到芯片的工作模式、电源分区的实现、时钟复位的考虑、子系统控制数据交互方式、低功耗软件实现、低功耗

耗方案的可实现性、低功耗方案的可测试性、低功耗方案的验证等一系列因素。设计好的方案,还需要进行一系列的功耗评估工作,进行系统工作场景的功耗分析和功耗统计,从各种设计因素对方案进行优化和改进,最终完善低功耗架构。

3.3 先进封装技术

随着半导体工艺从摩尔时代进入后摩尔时代,单纯缩减Si工艺尺寸来提高芯片的集成度以减小芯片面积趋于极限,先进封装技术不断发展变化以适应各种半导体新工艺和材料的要求,同时应对成本、性能和高集成度挑战,如图7所示。

芯片性能越来越高,管脚数量越来越多,传统的包括方形扁平无引脚封装(QFN)、方型扁平式封装技术(QFP)、球阵列封装(BGA)在内的封

装技术无法满足高性能芯片对电性能和抗电磁干扰,因此发展出电磁抗干扰能力强并导电性强及散热性能高的倒装封装技术(FC)。

手机等终端消费产品的低成本要求越发强烈,而国际金价一直保持高位,因此低成本的铜线工艺封装已经大规模应用在消费类芯片中,成本和性能都有明显的优势。

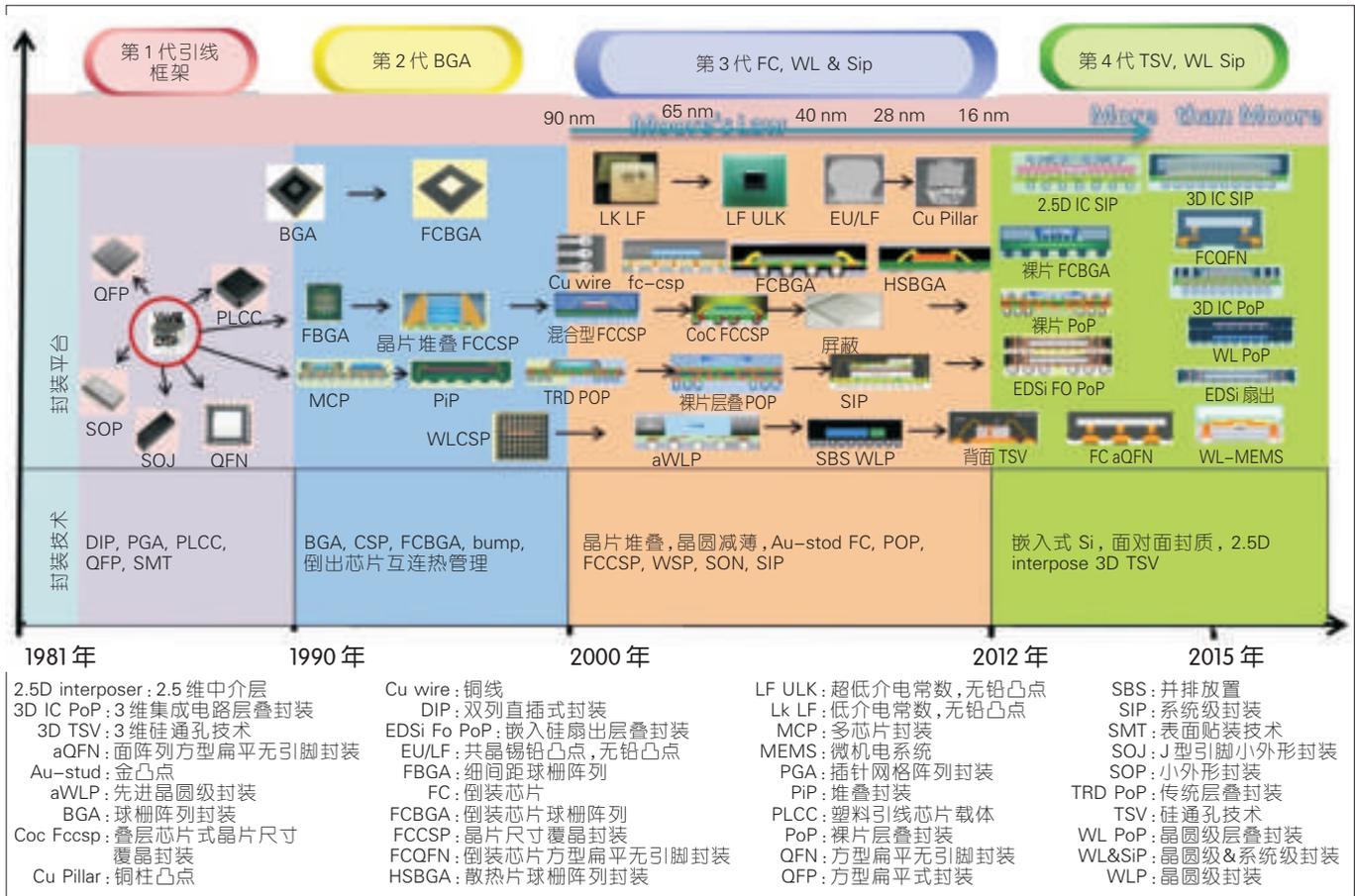
当前电子产品总的发展趋势是小型化、高性能化、智能化。同时电子产品的迭代速度也在不断加快,因此需要半导体产品设计周期短、功能集成度高、性能强大。为了实现多个功能模块内部互联,简化产品系统设计,降低系统成本,越来越多的多die封装如堆叠封装(PiP)、层叠封装(PoP)、系统级封装(SiP)、裸晶片PiP等先进封装形式已广泛应用手机,穿戴及终端产品中。

另外为减小封装面积,降低器件重量及能耗,提高系统速度,封装形式从2D的平面封装逐步转向晶片堆叠、扇出、2.5维中介层和3维硅通孔技术(3D TSV3)的PoP、SiP,目前这些技术已逐步应用在相关领域芯片^[5]。

4 结束语

半导体工艺和技术的发展使得芯片变得越来越小型化,高性能、低成本、低功耗和智能化的芯片产品会越来越多。半导体技术和产业的发展趋势集中体现在:

- 半导体在 M-ICT 这一融合化的发展趋势下,面对更多新的技术挑战和创新,以及技术和市场方向。
- 跨界已经无所不在,芯片设计也面临着各种产品和技术的融合,尤其是通信功能已经逐渐成为芯片中必备的功能。



▲图7 半导体封装演进

• 软件可定义化对芯片设计带来了更多架构上的挑战和冲击,同时围绕新的芯片架构下的低功耗设计是该结构能够成功应用的关键。

• 芯片小型化、智能化发展使得适应多种场景,实现多种功能的芯片逐渐成为主流,单一功能的芯片日益边缘化,因此满足快速推出芯片的先进封装技术成为半导体的热点。

半导体是 ICT 产业的基石,半导体技术和产品发展趋势与 ICT 产业交互影响,它的发展趋势将推动 ICT 加速融合。中国现正在围绕 ICT 融合推动“互联网+”、“工业 4.0”等国家

战略,半导体产业面临重大的机遇和挑战。抓住移动互联网、物联网、工业互联网带来的新的产业机会,能够使中国半导体产业尤其是芯片设计实现更快的发展,从而实现中国芯,全球梦。

参考文献

- [1] [科技] 芯片:“中国芯”迎来战略机遇期[N]. 参考消息, 2015-01-13
- [2] 2014 年物联网产业链现状分析[EB/OL]. <http://www.netofthings.cn/GuoNei/2014-11/3553.html>
- [3] 何为工业互联网的真正概念[EB/OL]. <http://www.iot-online.com/xingyeyingyong/si/2013/0730/24460.html>, 2013-07-30
- [4] 西门子描绘“工业 4.0”路线图,助力中国向工

- 业强国转型[EB/OL]. <http://www.gongkong.com/news/201501/320852.html>
- [5] 浅析物联网产业的核心技术[EB/OL]. <http://www.enet.com.cn/article/2012/0604/A20120604118345.shtml>, 2012-06-04

作者简介



王晓明,中兴通讯微电子研究院院长;主要负责高端路由器、核心网产品研发及公司级技术平台建设;主导开发的 ZXJ10 数字程控交换系统,获得国家级新产品奖、科技部火炬优秀项目一等奖等奖项。

综合信息

《中兴通讯技术》第 7 届编辑委员会新增编委简介

洪伟:东南大学信息科学与工程学院院长,长江学者计划特聘教授,IEEE Fellow。主要研究领域为计算电磁学和移动通信射频技术;承担国家“973”项目、国家自然科学基金委创新群体科学基金等 20 多个重要项目的研究工作。曾获国家自然科学四等奖、国家教委科技进步一等奖。

李军:清华大学研究员、信息技术研究院院长,清华大学信息科学与技术国家实验室常务副主任。主要研究领域为网络信息分类与过滤、网络流量观测与控制等;曾主持过“863”目标导向课题“一体化网络数据深度安全检测与分析的技术与系统”等项目。曾获 2014 年中国电子学会科学技术奖二等奖。

李涛:南京邮电大学计算机学院院长,美国佛罗里达国际大学计算机学院教授。主要研究领域为数据挖掘、信息检索、生物信息学、基于矩阵与张量理论的数据挖掘等。

刘建伟:北京航空航天大学电子信息工程学院教授、博士生导师。主要研究领域为密码学、信息安全、网络安全。曾获国家技术发明一等奖、国防技术发明一等奖。

吴春明:浙江大学计算机科学与技术学院教授,国家“十二五”“863”计划信息领域网络与通信技术主题专家组专家。主要研究领域为人工智能、新型网络体系结构等;主持或参加了多项国家“973”基础研究项目、国家自然科学基金项目。

张云勇:中国联通研究院副院长,中国通信学会、电子学会、计算机学会高级会员。主要研究领域为下一代开放网络、固定移动融合核心网、移动互联网及业务、公共运算等。

钟章队:北京交通大学计算机与信息技术学院院长,北京交通大学学术委员会委员。中国较早开展高速铁路无线通信与控制研究的专家,1994 年提出在中国建设和发展新一代铁路数字移动通信系统(GSM-R);现为轨道交通专用移动通信理论与关键技术方向首席专家,“面向高速铁路控制的无线移动通信系统研究”教育部创新团队带头人。

周亮:南京邮电大学通信与信息工程学院副院长,IEEE 多媒体通信技术委员会秘书长,2010 年被遴选为德国洪堡学者,2012 年入选国家“青年千人计划”。主要研究领域为无线多媒体通信。主持参与了德国洪堡基金会车联网项目、法国国家自然科学基金无线多媒体通信项目和安全多媒体通信项目。

CoLoRCache: 智慧协同网络中的协作缓存机制

CoLoRCache: Cache Cooperation Mechanism in Smart and Cooperative Networks

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 04-0051-005

摘要: 介绍一种有效支持缓存协作的未来网络体系架构: 智慧协同网络, 然后提出了一种高效的协作缓存机制, 称为 CoLoRCache。CoLoRCache 的主要目标是减小缓存冗余和建立缓存共享机制。我们通过仿真结果来验证 CoLoRCache。仿真数据表明, 相比较于其他缓存机制, CoLoRCache 能够产生更高的缓存命中率和有着最小的请求命中距离。

关键词: 智慧协同网络; 网络缓存; 协作缓存

Abstract: In this paper, we propose a possible future network architecture that supports cache cooperation. We also propose intra-domain cache cooperation, called CoLoRCache, to increase cache efficiency. Our main goals in CoLoRCache are to reduce the caching redundancy significantly and construct a novel cache-sharing mechanism. We use trace-driven simulations to analyze the quantitative benefits. The simulation results show that, compared with other caching mechanisms, CoLoRCache provides a higher cache hit ratio and achieves the minimum hit distance.

Key words: smart and cooperative networks; in-network caching; cache cooperation

张萌/ZHANG Meng
周华春/ZHOU Huachun
罗洪斌/LUO Hongbin

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)
(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

据包, 以减小缓存冗余。在 Breadcrumbs^[11] 中, 内容路由器建立路由轨迹, 以提高缓存内容可用性。而最近研究界提出的缓存优化机制^[12-13] 均采用了缓存信息通告来实现缓存协作。

需要注意的是, 已提出的缓存协作机制都是基于 NDN 体系架构。考虑一个由 V 个内容路由器组成的 NDN 网络, 我们假设一段时间内该 NDN 网络中所有内容路由器的平均缓存命中率为 R , 每一个内容路由器收到的服务请求数量为 N 。如果每一个内容路由器在缓存服务数据包的时候, 向网络中其他的内容路由器通告缓存信息。那么该 NDN 网络中每一个内容路由器都需要处理 $(V-1) \times (1-R) \times N$ 个缓存通告消息。由此可见, 当网络规模扩大时, 协作缓存机制产生的通告开销也相应地增加。所以, NDN 网络体系无法兼顾协作缓存机制的效率和可扩展性。

为了解决这个问题, 我们在文中首先介绍一种有效支持缓存协作的未来网络体系架构: 智慧协同网络。

对服务内容命名成为了未来网络体系架构研究者的共识。目前, 研究者们提出了诸多未来网络体系架构, 例如面向数据的网络结构 (DONA)^[1]、内容中心网络 (CCN)^[2] (后来被命名为命名数据网络^[3] (NDN))、4WARD^[4] (后来被命名为可扩展和可适应的网络方案 (SAIL)^[5])、基于发布-订阅的互联网路由模式 (PSIRP)^[6] (后来被命名为基于发布-订阅的互联网技术 (PURSUIT)^[7])、以及智慧协同网络^[8]。不同于传统网络利用网络节点地址, 这些未来网络架构依靠与位置分离的内容名字完成服务内容的获取。

尽管这些未来网络体系架构有着不同的设计目标和细节, 他们均提出利用网络缓存来提高未来网络的服务质量。

缓存机制要求有限的缓存资源能够响应更多的服务请求, 同时产生更小的服务请求命中距离。而传统的网络缓存机制^[9] 面临着两个需要解决的问题: 缓存冗余和缓存内容可用性限制。

这两个问题降低了缓存机制的效率。为了实现高效的缓存机制, 研究者们提出了诸多缓存优化机制。这些缓存优化机制都试图减小缓存冗余, 或者提高缓存可用性, 或者两者兼有。例如, Probcache^[10] 要求内容路由器概率性地缓存转发的内容数

收稿日期: 2015-04-10
网络出版时间: 2015-05-06

同时,基于智慧协同网络,我们提出了一种高效的缓存协作机制,称为CoLoRCache。

1 智慧协同网络

作为研究基础,我们在这一节中简单介绍智慧协同网络,更多的细节请参考文献^{[8], [14-15]}。智慧协同网络是一种全新的未来网络体系架构,其核心思想是通过动态感知网络状态并智能匹配服务需求,进而选择合理的网络族群及其内部组件来提供智慧化的服务,并通过引入行为匹配、行为聚类、网络复杂行为博弈决策等机制来实现资源的动态适配以及协同调度。

智慧协同网络的“三层”、“两域”总体系架构模型,如图1所示。三层即智慧服务层、资源适配层和网络组件层;两域即实体域和行为域。在三层、两域新体系结构模型中,智慧服务层主要负责服务的标识与描述,以及服务的智慧查找与动态匹配等;资源适配层通过感知服务需求与网络状态,动态地适配网络资源并构建网络族群,以充分满足服务需求进而提升用户体验,并提高网络资源利用率;网络组件层主要负责数据的存储与传输,以及网络组件的行为感知与聚类等。使用服务标识(SID)来标记一次智慧服务,实现服务的资源和位置分离;使用族群标识(FID)来标记一个族群功能模块;使用组件标识(NID)来标记一个网络组件设备,实现网络的控制和数据分离及身份与位置分离。

在智慧协同网络中每个自治域维护一个资源管理器(RM),并用来管理网络资源和服务资源。如图2中实线所示,当某个网络组件(例如位于自治域D_c的用户A)需要获取某个服务内容时(例如SID_A,由网络组件Server发布),用户A向其本地RM(例如RM_A)发送服务请求消息。该服务请求消息包含该网络组件的组件身份标识、所需服务的标识等

信息,如图2中(1)所示。RM_A收到该服务请求后,如果本地有其他网络组件(例如某个内容路由器)能够提供所需服务,则直接将该请求转发给该内容路由器。否则,将该请求发送给其某个邻域(如provider)的RM(即RM_F)。此时,自治域D_A和D_F之间的域间路径P₂为一个域间路由族群。RM_A在请求包头中添加对应的路径信息,并将服务请求转发给RM_F,如图2中(2)所示。类似地,RM_F将服务请求转发给RM_C,如图2中(3)所示。此时,RM_C可以在其服务注册表中查到该服务标识的条目,因此向RM_E转发该服务请求,如图2中(4)

所示。RM_E收到该服务请求后,根据其本地策略决定将该服务请求并转发给RM_C,如图2中(5)所示。此时,RM_C知道网络组件Server提供所需服务,于是将服务请求转发给Server,如图2中(6)所示。当每个RM向其邻域转发服务请求的时候,该RM根据其本地策略,选择一条该域与其邻域的域间路由族群,并附加在服务请求后面,发送给其邻域的RM,从而完成服务标识到族群标识的映射。

数据包转发流程示意如图3^[8]所示。网络组件Server收到服务请求后,知道去往服务请求者A的域间路由族群。此时,它将收到的域间路由

图1 智慧协同网络“三层”、“两域”总体模型

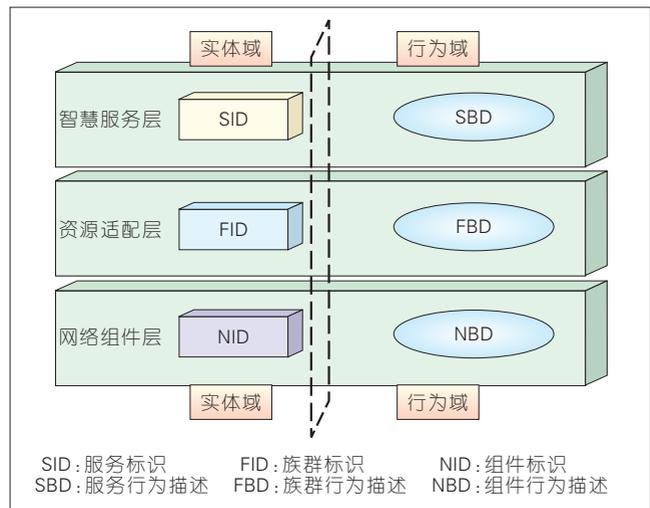
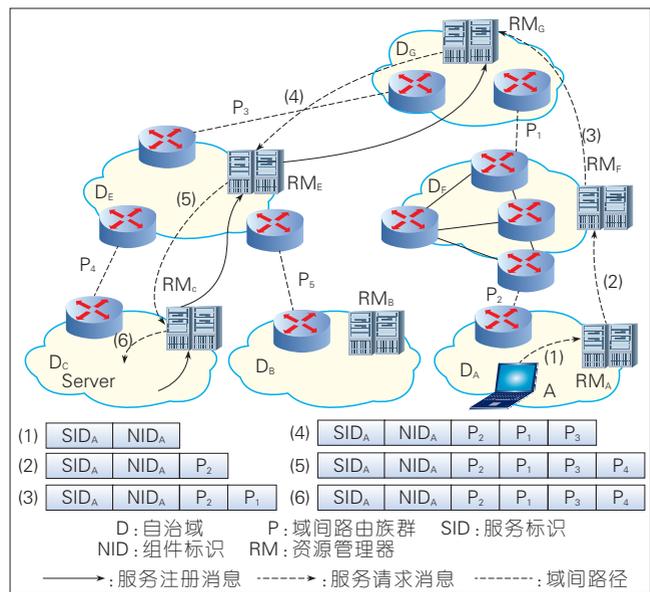


图2 智慧协同网络服务请求流程示意



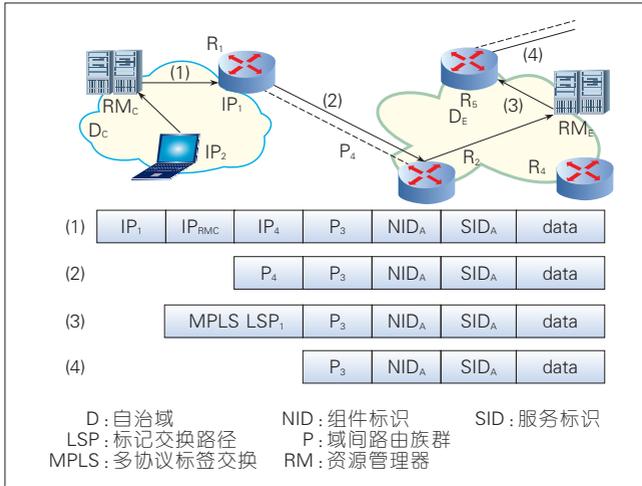


图3 智慧协同网络服务数据包转发流程示意

族群、所需服务的服务标识、服务请求者的组件身份标识等放在分组头部。然后,它将服务数据包发送至本地RM。RM收到数据包后,查找其本地域间路由表,发现路由族群 P_4 在该域的端点为 R_1 。假定域 D_c 利用IP做域内路由,则RM为数据包封装一个IP报头,报头的目的地址为 R_1 的IP地址(IP_1)。然后RM将数据包发送给 R_1 。 R_1 收到数据包后,剥去IP报头,知道数据包应该沿着路由族群 P_4 转发出去,于是将数据包向路由族群 P_4 转发。当数据包到达路由族群 P_4 的另一个端点 R_2 时, R_2 剥去数据包头部的路由族群 P_4 ,并将数据包发送至 RM_E 。 RM_E 收到数据包后,知道数据包应该沿着路由族群 P_3 转发。于是, RM_E 查找其域间路由表,了解到路由族群 P_3 在该域的端点为 R_3 ,并采用该域的路由机制(图3中假设该域采用多协议标签交换MPLS)将分组转发给 R_3 。同理, R_3 将该分组向路径 P_3 转发。如此继续,服务数据包将被发送给服务请求者A。

由此可见,智慧协同网络能够解决现有互联网中存在的服务的“资源和位置绑定”、网络的“控制和数据绑定”及“身份与位置绑定”等问题。这种全新的网络体系与机制的设计,能够在有效解决网络可扩展性、移动性、安全性等问题的基础上,大幅度提高网络资源利用率,降低网络能

耗,显著提升用户体验。同时,智慧协同网络能够有效支持协作缓存机制,提高缓存效率。

2 CoLoRCache

2.1 CoLoRCache 缓存协作机制设计

在智慧协同网络中,由RM负责管理本域的缓存资源。每个RM均建立缓存摘要表,表中每一条条目记录了域内的某个内容路由器的信息,包括:该内容路由器的组件标识、缓存命中次数、偏心度(E_c)、被该内容路由器缓存的数据包的服务标识。其中,内容路由器(例如 R_n)的偏心度由公式(1)计算得到:

$$Ec(R_n) = \max_{V_{R_i, R_n}} c(R_n, R_i) \quad (1)$$

其中, R_i 是域内的某个内容路由

器,而 $c(R_n, R_i)$ 是 R_n 到 R_i 之间最短路径的代价。

以图4中的 RM_A 为例,说明服务内容的检索过程。在 RM_A 的缓存摘要表中一条条目包含了域内的一个内容路由器的组件标识(标记为 R_n)、命中次数、偏心度和已缓存数据包的服务标识。图4为一个资源管理器 RM_A 在收到来自客户端的服务请求包完整的处理流程,主要可以分为4个步骤。

步骤1:服务请求者Client发送针对一个服务内容的服务请求,如图4中(1)所示;

步骤2: RM_A 收到该服务请求时,首先查询缓存摘要表,如图4中(2)所示。如果缓存摘要表中有该服务标识对应的条目,则进入步骤3;如果没有,则进入步骤4;

步骤3:根据缓存摘要表中对应条目记录的组件标识, RM_A 将服务请求发送至该组件标识对应的内容路由器处,同时将对应条目的缓存命中次数加1,如图4中(3)所示;

步骤4: RM_A 查询注册表,并根据注册表将服务请求发送至下一跳RM,如图4中(4)所示。

当收到服务数据包时,RM将决定是否在域内缓存该数据包的副本。如果需要缓存,CoLoRCache在域内对相同的服务数据包只保留一份副本。RM则使用内容放置算法在域内选择内容路由器作为该副本的缓

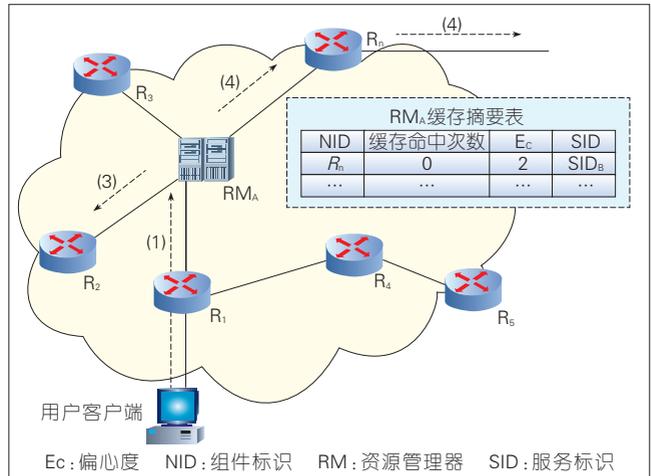


图4 资源管理器处理服务请求包流程示意

存位置,并向该内容路由器发送数据包的副本。资源管理器在缓存摘要表中记录该缓存信息。内容路由器将发送至本地的数据包副本缓存在本地。

2.2 CoLoRCache 内容放置算法

我们用 $G_0 = (V_0, E_0)$ 代表某个自治域的网络拓扑,其中包含了 $|V_0|$ 个内容路由器, $|E_0|$ 条链路。 V 是网络中命中次数最低的内容路由器的集合,当资源管理器收到数据包时,调用下述的内容放置算法在域内选择某个特定的内容路由器来缓存该数据包的副本,如**算法1**所示。

算法1 CoLoRCache 内容放置算法

Input: $G_0 = (V_0, E_0)$;

Output: R , R 为选择的内容路由器;

```

1: Construct the set  $V$ 
2: if  $|V| == 1$  then
3:  $R \leftarrow V$ 
4: else
5: Choose from  $V$  the element  $J$ 
   with the minimal  $Ec(J)$ 
6:  $R \leftarrow J$ 
7: end if

```

算法1包含4个步骤。

步骤1:根据缓存摘要表,选出集合 V_0 中当前命中数量最小的内容路由器放入集合 V 中;

步骤2:根据 $|V|$ 值,进行判定,如果 $|V| > 1$,进入步骤3;如果 $|V| = 1$,进入步骤4;

步骤3:选择集合 V 中的元素,结束算法;

步骤4:选择集合 V 中的偏心度最小的元素,结束算法。

CoLoRCache 内容放置算法的增益效果是将数据包优先缓存在缓存命中次数最低的内容路由器,以提高缓存效率。当多个内容路由器缓存命中次数相同时,该算法能够将数据包优先缓存在更加位于拓扑中心的内容路由器处,以降低获取该数据包

的成本。

3 仿真实验

为了验证缓存性能,我们在 OMNeT++ 上对 CoLoRCache 进行了仿真实验,基于一个实际的拓扑和一个生成的拓扑。实际的拓扑为 AS-3967,其拓扑信息来自 Rocketfuel^[16]。同时,我们利用 Tier^[17] 生成一个分层的拓扑,由1个骨干网和3个接入网组成。我们在**表1**中列出了详细的拓扑参数。

我们在 OMNeT++ 中部署了目前已提出的其他缓存优化机制:

- All-Cache。All-Cache 是传统的缓存机制,它要求每一个内容路由器在转发数据包的同时,都在本地缓存保留一份数据包的副本。

- Prob-Cache。Prob-Cache 是概率性缓存机制,主要分为 Prob(p)^[18] 和 ProbCache。在 Prob(p) 中,内容路由器以某个固定的概率缓存转发的数据包。在仿真中 Prob(p) 要求内容路由器缓存一个转发的数据包的概率为 0.75,只转发该数据包的概率为 0.25。而在 ProbCache,内容路由器根据其在下载路径上的位置计算缓存概率。同样的,在 Prob-Cache 中,每一个内容路由器都只知道本地的缓存状态。

- Ran-Cache。Ran-Cache 的原型是 CATT。两者不同的地方在于,我们将 Ran-Cache 部署在了智慧协同网络中,目的在于验证内容放置算法。

▼表1 仿真参数

仿真参数	设定值	
	AS-3967	Tier
内容路由器数量	19	32
自治域数量	1	4
用户数量	180	600
内容源数量	1	6
服务内容数量	100 000	
缓存空间大小	0.5% ~ 5%	
缓存替换算法	LRU	
LRU: 最近最少使用		

除了不同的内容检索和转发方法,与 CATT 相比,Ran-Cache 中每一个域的资源管理器能感知本域的缓存状态。

- Cop-Cache。Cop-Cache 的原型是 CPHR^[19]。两者不同的地方在于 Cop-Cache 被部署在了智慧协同网络,因此每一个域的资源管理器能够感知本域的缓存状态。

在仿真中我们验证了多个缓存性能参数,包括缓存命中率 and 平均命中距离。同时,在仿真中服务内容的访问频率模型符合 Zipf 分布,并将 Zipf 参数设定为 0.73。

3.1 缓存命中率优化

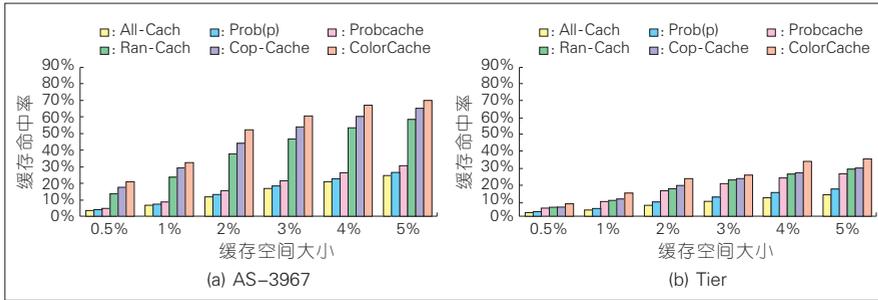
一次缓存命中意味着服务请求包被缓存所直接响应,而不需要被路由到内容源。缓存命中率是缓存命中的服务请求数占有所有服务请求数量的比重。缓存命中率能够直观地体现缓存效率。命中率越高,则意味着缓存机制越高效。

图5(a)展示了在 AS-3967 拓扑下,不同的缓存机制对于缓存命中率的优化。如图所示,我们将缓存空间大小表示为网络中缓存容量与仿真中所有服务内容大小的比值。在仿真中,我们逐步提高缓存容量并统计缓存命中率。随着缓存空间大小增加,缓存命中率也相应增加。其中,CoLoRCache 的缓存命中率最高。举例来说,当缓存空间大小为 5% 时,All-Cache、Prob(p)、ProbCache、Ran-Cache、Cop-Cache 和 CoLoRCache 的缓存命中率分别为 20.56%、32.25%、51.83%、60.56%、66.75% 和 70.06%。由此可见,跟其他的缓存优化机制相比,CoLoRCache 对缓存命中率的优化效果更加显著。

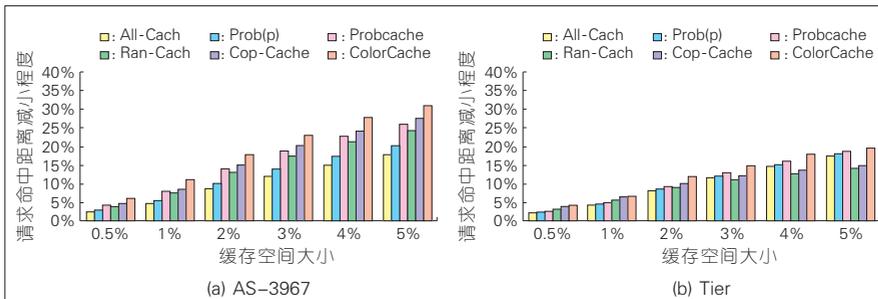
图5(b)展示了利用 Tier 生成的拓扑下,不同缓存机制的缓存命中率。在相同的仿真环境下,CoLoRCache 的缓存命中率更高。

3.2 命中距离优化

命中距离是测量服务时延的一



▲图5 缓存命中率优化



▲图6 命中距离优化

个参数,它被定义为请求找到所需内容的平均距离。图6展示了在不同仿真拓扑下的请求命中距离减少程度。根据图6,我们发现当缓存空间大小增加时,命中距离会相应地减小,这意味着更短的服务获取时延。同时,与现有的优化机制相比,CoLoRCache能够更有效地减少请求命中距离。

4 结束语

文章介绍了一种能够有效支持协作缓存的未来网络体系架构——智慧协同网络,并提出了一种基于智慧协同网络的协作缓存机制——CoLoRCache。CoLoRCache的基本思想是利用缓存共享来减小缓存冗余并提高缓存内容可用性。仿真建立在一个实际的网络拓扑AS-3967和一个生成的网络拓扑。大量仿真实验结果证明CoLoRCache在缓存命中率和平均命中距离上拥有更优的缓存性能。

参考文献

[1] KOPONEN T, CHAWLA M, CHUN B-G, ERMOLINSKIY A, KIM K H, SHENKER S, and

STOICA I. A data-oriented (and beyond) network architecture [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 181-192

[2] Project CCNX [EB/OL]. [2015-04-30]. <http://www.ccnx.org/>

[3] Named Data Networking [EB/OL]. <http://www.named-data.net/>

[4] The FP7 4WARD Project [EB/OL]. <http://www.4ward-project.eu/>

[5] Scalable and Adaptive Internet Solutions (SAIL) [EB/OL]. <http://www.sail-project.eu/>

[6] Publish-subscribe Internet Routing Paradigm [EB/OL]. <http://www.psirp.org/>

[7] Publish-Subscribe Internet Technology [EB/OL]. <http://www.fp7-pursuit.eu/PursuitWeb/>

[8] LUO H, CHEN Z, CUI J, ZHANG H, ZUKERMAN M, and QIAO C. Color: an information-centric internet architecture for innovations [J]. IEEE Network, 2014, 28(3): 4-10. doi: 10.1109/MNET.2014.6843226

[9] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, PLASS M F, BRIGGS N H, and BRAYNARD R L. Networking named content [C]// Proceedings of 2009 ACM CoNEXT conference, Rome, Italy, 2009: 1-12

[10] PSARAS I, CHAI W K, and PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks [C]// Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Helsinki, Finland, 2012:55-60

[11] ROSENSWEIG E J and KUROSE J. Breadcrumbs: Efficient, best-effort content location in cache networks [C]// Proceedings of 2009 INFOCOM, Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 2631-2635

[12] EUM S, NAKAUCHI K, MURATA M, SHOJI Y, and NISHINAGA N. Catt: potential based routing with content caching for icn [C]// Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM

Workshop on Information-Centric Networking, Helsinki, Finland, 2012: 49-54

[13] WANG J M, ZHANG J, and BENSOU B. Intra-as cooperative caching for content-centric networks[C]// Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM workshop on Information-Centric Networking, Hong Kong, China, 2013: 61-66

[14] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——体化网络与普适服务 [J]. 电子学报, 2007, 35(4): 593-598

[15] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249-1254

[16] CALVERT K L, DOAR M B, and ZEGURA E W. Modeling internet topology [J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(6): 160-163

[17] SPRING N, MAHAJAN R, and WETHERALL D. Measuring isp topologies with rocketfuel [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(4):133-145

[18] LAOUTARIS N, CHE H, and STAVRAKAKIS I. The lcd interconnection of lru caches and its analysis [J]. Performance Evaluation, 2006, 63(7): 609-634

[19] WANG S, BI J, and WU J. Collaborative caching based on hashrouting for information-centric networking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4):535-536

作者简介



张萌, 北京交通大学在读博士生, 主要从事新一代信息网络关键理论与技术的研究工作。



周华春, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师; 近年来主要从事互联网结构、移动互联网、移动和安全计算、路由协议、网络管理技术和数据库应用研究; 发表论文50余篇, 授权发明专利共18项。



罗洪斌, 北京交通大学教授、博士生导师, 现任北京交通大学下一代互联网互连设备国家工程实验室副主任、中国通信学会第四届青年工作委员会委员、北京通信学会第八届理事会理事; 目前主要从事未来互联网体系架构、理论与关键技术的研究; 正主持和参与多项国家“973”、“863”、国家自然科学基金项目; 近年来在通信领域高水平期刊与国际会议发表论文50余篇。

《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,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。审稿过程需要大约1个月左右。

2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用WORD文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括: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、结果与结论,以150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性,采用第三人称。中英文摘要内容应一致。
- (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].地点:学位授予单位,授予年
 - 专利[序号]专利所有者.专利题名.国别:专利号[P].公布日期
 - 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) 提供正面、免冠、彩色标准数码照片一张,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

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

中兴通讯技术

ZHONGXING TONGXUN JISHU

双月刊 1995年创刊 总第123期
2015年8月 第21卷第4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
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
投稿平台:www.zte.com.cn/paper
电子信箱: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:合肥添彩包装有限公司
出版日期:2015年8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