

# 面向云计算的下一代光网络技术研究进展

李明 张引发 任帅 王鲸鱼 廖晓敏

西安通信学院光纤通信实验室, 陕西 西安 710106

**摘要** 大数据云计算时代,光网络面临的挑战越来越突出,面向云计算的下一代光网络技术受到越来越多的关注。以光网络对云计算的支撑问题为切入点,得出了面向云计算的光网络所面临的最大挑战为光网络资源和IT资源按用户需求进行一体高效调度的问题。在解决对策方面,主要从光交换和传输技术、光网络路由技术、新一代光网络管控架构的设计和光网络虚拟化技术等方面,介绍了国内外最新研究进展。最后分析了面向云计算的下一代光网络技术的未来发展方向。

**关键词** 光通信; 云计算; 光网络管控架构; 光网络虚拟化

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.070003

## Research Progress of Next Generation Optical Networks Technology for Cloud Computing

Li Ming Zhang Yinfa Ren Shuai Wang Jingyu Liao Xiaomin

Laboratory of Optical Communication, Xi'an Communications Institute, Xi'an, Shaanxi 710106, China

**Abstract** In the big data and cloud computing era, with the challenges of optical networks increase, the next generation optical networks technology for cloud computing has attracted more and more attention. The issue of optical networks supporting cloud computing is regarded as a starting point. The biggest challenge of the optical network for cloud computing is summarized that optical networks resources and IT resources can be jointly and efficiently scheduled on customers' demand. The latest research progresses are introduced mainly from the optical switching and transmission technology, optical networks routing technology, new generation optical networks management and control architecture and virtualization technology of optical networks. Finally, the future direction of development for the next generation optical networks technology for cloud computing is analyzed.

**Key words** optical communications; cloud computing; optical networks management and control architecture; virtual optical networks

**OCIS codes** 060.4510; 060.4250; 060.4254; 060.4256

### 1 引言

如今,在一个崇尚数据的大数据时代,云计算正是解决大数据问题的灵魂。所谓云计算就是并行计算、分布式计算和虚拟化技术相融合并进一步发展的产物,其能够将基于网络的大量计算机集群统一抽象为一个资源池,向用户提供一种灵活、可伸缩、有弹性并具有极高健壮性的计算资源与存储资源的按需出租服务<sup>[1]</sup>。云计算集中体现了信息时代的强烈诉求和前进方向,越来越多的信息将会集中在规模化的数据中心里,随着云计算的普及,数据中心的规模和数量都会迅速膨胀。分析预测,到2020年,超过80%的基础设施都会被云包围<sup>[2]</sup>。

大数据云计算时代,客户已经不再满足于点对点的光路服务<sup>[3]</sup>,越来越多基于波长的复杂逻辑服务已经出现,传统“尽力而为”的互联网已经表现出能力的不足。为了满足新兴业务的需求,迫切需要新一代、大规

收稿日期: 2014-11-28; 收到修改稿日期: 2015-01-13; 网络出版日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61072125)、国防基金(2012JY002-260)

作者简介: 李明(1989—),男,硕士研究生,主要从事下一代光网络方面的研究。E-mail: limingxty@163.com

导师简介: 张引发(1964—),男,硕士,教授,主要从事光网络安全和下一代光网络方面的研究。

E-mail: yinfazhangxty@163.com

模、高性能的网络来实现用户和数据中心之间的互联。光网络经过几十年的发展,其大容量、高速率、低成本、并且越来越灵活的特点,使它成为了云计算的最佳承载网络,故可预见下一代网络将成为大量光网络资源(光交换设备、光器件、光纤、波长、带宽、接口和光时隙资源等)和IT资源(主要指光网络所连接的计算资源、存储资源等)的聚合体。与此同时,光网络面临的挑战也逐渐显现,如果能解决好这些挑战,势必将带来光通信技术发展的新飞跃。

## 2 面向云计算的光网络面临的挑战

近年来,光网络面向云计算出现能力不足的问题引起了越来越多研究人员的关注,从不同方面指出了云计算时代光网络面临的挑战:

1) 对巨大带宽的灵活控制。在如今的大量新兴业务需要 10 Gb/s 甚至是 100 Gb/s 带宽的驱动下,用户的应用需要 1 Gb/s 的带宽已经很平常,例如大数据存储、高清或超高清多媒体应用、超远距离的数据中心应用等一些常见的新兴业务。但是如今,传统波分复用(WDM)光网络的“一刀切”模式,在灵活控制带宽方面遇到了瓶颈,无法满足按用户需求的随意调度<sup>[4]</sup>。

2) 光网络资源和IT资源的联合调度。云技术带来了大量动态灵活的IT资源,而这一切都要建立在高质量的网络控制上,所以联合光网络资源和IT资源,进行统一的调度是十分重要的。单从节能效果考虑,文献[5]中指出对光网络资源和IT资源进行联合调度的节能效果要高于传统两步调度方法(先确定IT资源节点,再选择一条单播路由)将近50%。光网络资源和IT资源需要相互作用,从而实现更好地管理、动态地调度并且组合服务,但这是传统光网络所不能达到的。

3) 处理不可预测的突发性业务。云计算应用的兴起导致了网络流量的不可预知性,业务的突发性需要一种全新的机制来支持服务和应用的动态运作。另一个重要的问题是,随着网络规模的不断壮大,网络业务将会变得越来越分散。所以未来的光网络架构需要满足分散的、突发的或者是不可预测的业务需求<sup>[6]</sup>。

4) 让服务更节能。现今信息与通信技术(ICT)的消耗占全世界能源消耗的4%<sup>[7]</sup>,并且随着云计算的发展,大量大规模的数据中心将会陆续建成,能耗将会以无法想象的速度增长。因此,在光网络资源和IT资源的配置上,应该考虑全局优化的能耗感知方案。

5) 确保安全可靠的服务。由于现今社会对信息系统的高度依赖,网络服务中断和黑客攻击受到越来越多的重视。随着光网络复用信道数量的不断扩展、速率容量的不断增长以及承载业务的不断丰富,即使攻击造成的服务破坏时间很短,也会造成大量的数据丢失或破坏<sup>[8]</sup>。云计算时代,对承载海量信息传输任务的光网络来说,必须要确保安全可靠的服务。

6) 制定一个可持续发展的战略和商业模式。目前,电信运营商提供的服务主要是建立在其现有的基础设施上。在IT服务提供商的利益链中,网络基础设施还不被认为是一种服务,在服务配置阶段,运营商不能提供多元化的网络资源和服务业务的平滑集成<sup>[9]</sup>。所以,在云计算时代,迫切需要一种网络资源和应用资源联合提供的商业模式。

综上所述,在云计算时代,光网络所面临的最大挑战是光网络资源和IT资源按用户需求进行一体高效调度的问题。这里的“按用户需求”指的是光网络要适应云计算按用量计费的付费模式,能够根据用户对服务时间、服务粒度和服务质量的需求来自主灵活地建立和拆除服务。所以,按需调度是一个基本问题。这里的“一体”指光网络资源和IT资源的联合调度。试想,面对一个云存储业务,即使数据中心的服务器中有充足的存储空间,但如果连接服务器的光网络带宽已经饱和,就将无法满足服务请求;反过来说,即使光网络中有足够的带宽,如果服务器的存储空间变的紧缺,服务也将被阻塞。所以,联合调度是一个关键问题。这里的“高效”指光网络的服务效能要更加优化。从运营商的角度来说要进一步节约运维成本,能耗和网络资源利用率就要更加优化。所以,高效调度是一个重要问题。

## 3 面向云计算的下一代光网络技术

为了解决云计算时代光网络资源和IT资源按用户需求一体高效调度的挑战,国内外相关研究主要从光交换和传输技术、光网络路由技术、新一代光网络管控架构设计和光网络虚拟化技术等方面入手,提出了一些光网络应对挑战的策略。

### 3.1 国外研究现状

#### 3.1.1 光交换和传输技术

云计算复杂多样的应用模式对光网络节点的交换能力提出了新的要求。在传统光电路交换(OCS)中,同一条光纤链路上的不同光通道必须具有不同的波长,但是,由于波长数目的限制,以及OCS采用的双向预留机制,建立和拆除一条通道需要一定的时间,因此OCS在不断增长且突发不定的云业务流量中很难适应。光分组交换(OPS)在光信号层面上以光分组作为最小的分组颗粒实现分组交换,带宽利用率较高,适合传输突发数据业务。但是OPS目前仍有许多技术难题有待解决,最突出的是缺乏高速光逻辑器件和光缓冲存储器<sup>[10]</sup>。因此,OPS在大数据云计算环境下的应用前景并不被看好。光突发交换(OBS)具有面向IP业务的快速资源分配和高资源利用率的优点,它在融合OCS和OPS优点的同时克服了两者的不足,能够有效地支持高突发、高速率的云计算业务。因此,OBS在短时间内得到了国内外众多研究机构的广泛关注<sup>[11-12]</sup>,被认为是面向云计算的下一代光网络的一种较理想的数据交换模式。

光传输技术相比于其他传输技术,能够以极低的延迟传输极高的数据容量,是实现长距离大容量传输的最佳方式。传统WDM技术将只位于规定栅格位置的波长分配给用户,而均匀的波长间隔直接决定了通道可用带宽大小与用户容量和数据速率无关,即无法实现按需分配。文献[13]采用基于正交频分复用(OFDM)的频谱灵活技术将OFDM的多载波调制技术与波长选择性开关(WSS)结合在一起使用,如图1所示,利用OFDM技术把波长调制为多个正交子载波,然后通过WSS来选择子载波并分配,实现了在云计算环境下的动态应用。这种基于OFDM的频谱灵活技术引起了学术界的极大兴趣<sup>[14-15]</sup>。其相对传统的WDM技术从频域上划分最小粒度单元,如图2所示,并可根据业务需求分配一定数量的邻接频谱单元,从而实现根据用户需求和实际业务量大小动态有效地分配适合的频谱资源和配置相应的调制方式,能够很好地解决云计算时代对巨大带宽灵活控制的问题。

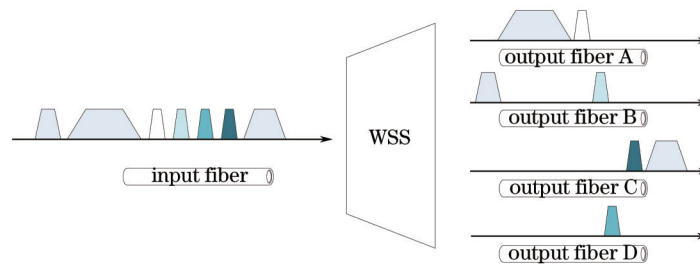


图1 波长选择性开关模型

Fig.1 Model of WSS

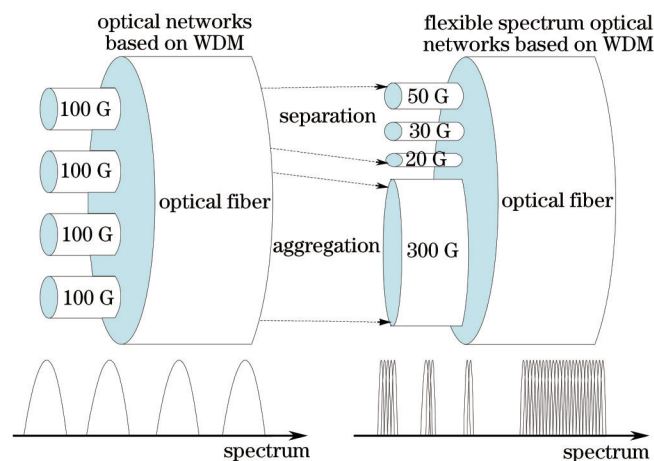


图2 基于OFDM的频谱灵活光网络与WDM光网络比较

Fig.2 Flexible spectrum optical networks based on OFDM versus optical networks based on WDM

#### 3.1.2 光网络路由技术

通常情况下,光网络使用单播(unicast)路由从一个源节点到一个给定的目的节点来传送数据。但在云计算环境下,用户发起的任务可以被多个数据中心共同服务,而且,相比于准确的服务地点和网络路由,用



户更加关心的是服务质量和用户体验。因此在面向云计算的光网络中多使用任播(anycast)或多播(multicast)路由<sup>[16]</sup>。文献[17]使用任播路由,为用户寻找最合适的数据中心,达到了节能和减少服务开销的目的。另一方面,在面向云计算的光网络中实施路由算法要特别考虑到数据中心中存储和计算资源的特性,必须把数据中心资源和光网络资源一体考虑,实施联合调度。文献[18]把任务请求分为了不同的优先级,然后按照优先级把每一个请求分配给特定的IT资源服务器,实现了数据中心资源和光网络资源的联合调度。文献[19]不但解决了联合调度问题,还特别考虑了基础设施提供商(InPs)的经济效益问题。文献[20]中,提出一种面向服务的资源联合调度算法,目的是通过最大化用户接入数量并且最小化就跳数而言的资源利用率,在多个InPs中选择最优的资源来提升服务质量。文献[21]中提出了一个新颖的联合控制架构——面向服务的联合机制(SOGE),并且提出了一个光网络资源和IT资源联合调度算法(RJSA),并在新提出的架构上对算法进行了仿真。还有一些研究者把数据中心资源和光网络资源的联合调度视为应用层和网络层资源的跨层优化问题,在对基于数据中心的应用研究中,提出了跨越应用层和网络层的优化方案<sup>[22]</sup>。

### 3.1.3 新一代光网络管控架构

将复杂的IT资源整合到光网络中是面向服务的光网络的关键技术,也是实现面向服务的光网络的难点。对运营商而言,统一调度这些资源使全网性能和用户代价最优,需要一个统一的资源管理模型支持。然而现有的面向服务的光网络(如ASON)还无法对IT资源进行自动发现、管理和调度,也就无法实现光网络资源和IT资源的统一调度<sup>[23]</sup>。所以在新一代光网络管控架构的设计上来应对挑战得到广泛研究。

近年来国外有许多项目都致力于新一代光网络管控架构的设计。2008年展开的PHOSPHORUS计划<sup>[24]</sup>,针对端到端跨层网络服务、独立高性能传输域的关键技术、通用多协议标签交换协议被拓展成拥有网格的特性,不仅提供了非常好的业务粒度,还第一次用光网络方法解决了新兴的网格服务需求。2010年,宾夕法尼亚州大学与其他11所大学联合开展了NEBULA项目<sup>[25]</sup>的研究。该项目的目标是建立一个以云计算为中心的光网络架构,该架构包括提供高可靠性和高扩展性的核心网络交换数据中心,用来提供海量的数据服务。它支持在多数数据中心进行服务选择,提供了多路径传输、基于策略的可控路由等机制。欧洲2012年启动的GEYSERS计划<sup>[26-27]</sup>,设计了一个多域实验环境,关键目标是提供一个多目标测试环境和基于云的复杂基础设施服务,如基于云的传统计算、存储和光网络服务等。特别的是,这个架构提出了一个可供参考的基础设施作为服务(IAAS)的模式,是未来光网络管控架构的重要发展方向。

文献[28]中提出了一种面向服务的光网络(SOON)架构,介绍了一个可以在用户应用请求和网络服务之间形成映射的中间层,从而填补了用户和光网络之间的信息代沟。文献[29]在SOON架构的基础上,提出了多粒度光网络(MGON)来发送不同粒度等级的云服务。这种基于SOON的多粒度光网络实现了应用请求和边缘节点的动态相互作用。

软件定义网(SDN)被认为是未来网络的必然发展趋势。图3为SDN的逻辑架构,它通过分离网络设备的控制与数据面,将网络的能力抽象为应用程序接口(API)提供给应用层,从而构建了开放可编程的网络环

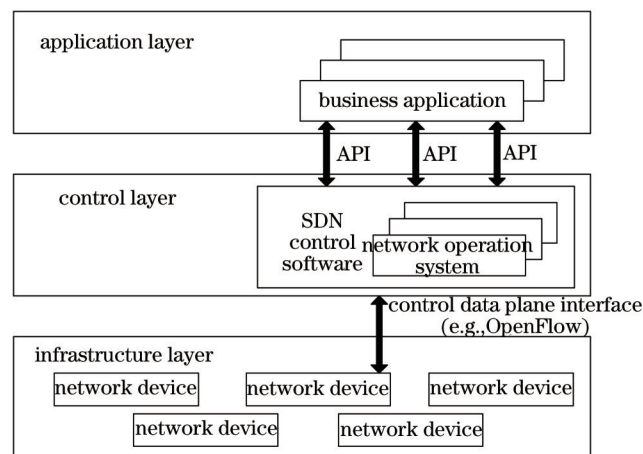


图3 SDN的逻辑架构

Fig.3 Logical architecture of SDN

境,在对底层各种网络资源虚拟化的基础上,通过网络操作系统(NOS)以软件驱动的方式实现灵活、高度自动化的网络控制和业务配置。

越来越多的研究者开始把SDN的概念引入光网络,文献[30]提出了一种基于SDN的面向云计算的光网络联合控制架构,它可以联合最新的光传输技术,比如弹性光网络技术,允许网络运营商和云计算服务提供商根据用户的需求来动态定义基础设施,以此减小额外的开支和运维费用。文献[31]提出了一种由光网络设备和可编程OpenFlow控制器组成的软件定义光网络网络结构,该结构具有操作任何用户定义的网络协议和场景的能力,能够提供智能的、用户控制的和可编程的光网络服务。

### 3.1.4 光网络虚拟化技术

虚拟化技术是云计算的核心技术,其实质是实现物理层向逻辑层转化的一种逻辑简化技术。网络虚拟化技术被认为是支持未来网络演进的关键使能技术,文献[32-34]从发展背景、关键技术和研究项目等方面对网络虚拟化做了详细而全面的综述。光网络虚拟化属于网络虚拟化中的最底层技术,指的是多个孤立的光虚拟网络同时共存于一个共享的光物理网络的网络组成技术。虚拟化是云计算的主要标志,所以,为了适应云计算的服务形式,对光网络进行虚拟化是十分必要的。尽管网络虚拟化技术已经得到了一定的研究,但关于光网络虚拟化的研究还十分有限。

在传统固定栅格(fixed-grid)光网络虚拟化方面,文献[35]中提出了两种分别针对单线率和混合线率光网络场景的虚拟光网络映射算法,其特点是能够实现对物理层损伤的感知。文献[36]中特别考虑到了虚拟光网络构成中的错误恢复问题。文献[37]同时考虑节点和链路的映射问题,提出了一些构成虚拟光网络的启发式算法。文献[38]针对虚拟光网络请求的不可预测性,对虚拟光网络的周期性重构做了研究。在灵活栅格(flexible-grid)光网络虚拟化方面,文献[39-41]对弹性光网络的虚拟化原则和关键技术做了简要的综述,指出传统WDM网络虚拟化的方法在弹性光网络中已不能直接使用。文献[42]把传统WDM光网络和灵活栅格光网络的虚拟化视为混合整数线性规划问题,并提出了MaxMapping和MinMapping两种启发式算法,最后基于频谱资源利用率,对这两种光网络的虚拟化方法进行了比较。文献[43]分别研究了透明和不透明两种弹性光网络的虚拟化方法,并提出了一种新颖的分层辅助图法来解耦物理层资源。

近年来,基础设施虚拟化受到越来越多的关注,这里的虚拟化指的是光网络资源和IT资源的联合虚拟化。如图4所示,利用基础设施虚拟化技术,多个共存但孤立的虚拟基础设施(VI)可以在同一个物理基础设施(PI)上根据用户需求构建,这种VI可以满足光网络资源和IT资源联合提供的要求,并能够在极大提高运维灵活性的同时有效地减少开销。这种方法被认为是解决光网络所面临云计算挑战的最佳方法,但国内外针对这方面的研究都属于起步阶段。文献[44]全面分析了光网络虚拟化在云计算时代的作用,特别是提出了一种带有错误回溯功能的联合光网络资源和IT资源的虚拟化方案。文献[45]给出了虚拟基础设施的可靠性的概念,并在虚拟基础设施规划的过程中考虑到了弹性云服务请求的随机性。文献[46]把虚拟基础设施规划问题视为一种整数线性规划问题,从节能和最小资源利用率的角度对这一问题进行了研究。文献[47]中采用了一种改进的博弈论算法,用启发式算法更加高效地解决了动态虚拟基础设施规划的问题。文献[48]研究了无线网络和光网络联合的异构网络环境下的虚拟基础设施规划问题。

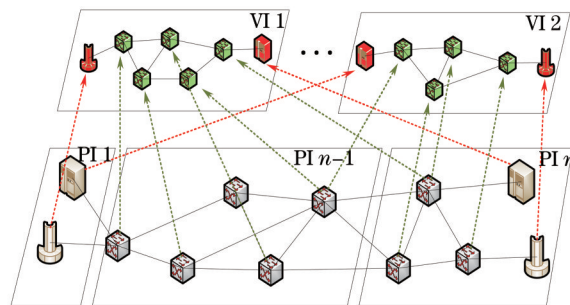


图4 基础设施虚拟化原理图

Fig.4 Virtualization of infrastructure

## 3.2 国内研究现状

在我国“十二五”期间,国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)以及

各种科学发展基金中,都把未来网络关键技术的研究放在了至关重要的位置。但在面向云计算的下一代光网络技术研究方面,国内起步较晚。

北京邮电大学在频谱灵活光网络和新一代光网络管控架构等方面做了持续而深入的研究,其主要研究方向为基于SDN的频谱灵活光网络管控架构。文献[49]中通过多个OpenFlow控制器的联合,部署了一种面向数据中心光网络的多层资源联合控制架构。文献[50]中提出了基于OpenFlow的频谱灵活光网络架构,并在文献[51]中实现了在大规模频谱灵活光网络中的部署。文献[52]中设计了面向数据中心应用的基于增强型SDN的频谱灵活光网络体系结构,通过部署传输感知跨层优化(TA-CSO)策略,证明了新架构的高效性。

上海交通大学和东北大学在光网络虚拟化方面也取得了一些研究成果。文献[53]运用在管理平面部署的虚拟光网络,构造了一种基础设施作为服务的虚拟光网络架构OptoVisor。文献[54]简要分析了虚拟基础设施规划中的挑战与方法,特别提出了一种在断电恢复场景下的虚拟基础设施规划方案。

## 4 结束语

为了应对云计算时代光网络面临的光网络资源和IT资源按用户需求实现一体高效调度的挑战,国内外研究人员主要从光交换和传输技术、光网络路由技术、新一代光网络管控架构的设计和光网络虚拟化技术等方面来考虑解决对策。

总体来看,大数据云计算的迅猛发展,使国内外研究机构对面向云计算的下一代光网络技术的研究越来越重视,目前这一方面的研究是光通信领域最新最热的研究方向之一。美国最早开展该领域的研究,研究重点在新一代光网络体系结构的顶层设计;欧盟则侧重于光网络虚拟化技术的研究,近年来随着GEYSERS计划的部署,在基础设施虚拟化方面取得了一定的研究成果;日本由于地震频发,主要针对光网络虚拟化中的抗毁性问题进行研究;我国研究起步较晚,但在基于SDN的频谱灵活光网络管控架构研究方面取得了一些较为前沿的研究成果。

在光交换和传输技术方面,OBS和基于OFDM的频谱灵活技术是大数据云计算时代的必然需求;在光网络路由技术方面,基于任播或多播路由技术的光网络和数据中心资源的联合调度策略是未来的主流方向;在光网络管控架构方面,IaaS和软件定义光网络技术是重要的发展方向;在光网络虚拟化方面,基础设施虚拟化技术将为IaaS实现成熟商用奠定坚实的基础。

总结全文,可知在以下研究方向可能会引发该领域新的研究热潮:

1) 光网络资源和IT资源的联合虚拟化。虚拟化技术能够满足资源的按需调度,目前的研究主要集中在光网络资源或者是IT资源的单独虚拟化,试想,如果让光网络具有计算和存储能力,同时考虑到光网络资源和IT资源的联合虚拟化(即基础设施虚拟化),采用合适的虚拟基础设施规划方案,势必能够节约基础设施提供商的运维成本,从而适应未来大数据云计算业务的突发性和灵活性,很好地解决光网络资源和IT资源按用户需求一体高效调度的问题。

2) 面向虚拟基础设施的新一代光网络管控架构。新一代光网络管控架构的设计主要是为了解决现有架构不能实现网络层和用户层资源感知的问题,但没有考虑到对虚拟基础设施的支撑和管控问题。现有的面向云计算的下一代光网络技术主要从管控架构的设计和虚拟化两方面来单独考虑,如果将软件定义光网络技术和光网络虚拟化技术在控制和虚拟两方面结合,研究面向虚拟基础设施的新一代光网络管控架构,势必对下一代光网络的发展带来深远影响。

## 参考文献

- 1 ZTE Institute. Dialog to Cloud[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012: 23-24.  
中兴通讯学院. 对话云计算[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012: 23-24.
- 2 Nelson M R. The next generation internet, e-business, and e-everything[C]. 25th Anniversary AAS colloquium of Science and Technology Policy, 2010.
- 3 Zhao Zisen. Past, present and future of optical fiber communications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900109.  
赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900109.
- 4 Zhao Yongli, Zhang Jie, Ji Yuefeng. Flexible Spectrum Optical Networks[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013: 1-2.  
赵永利, 张杰, 纪岳峰. 频谱灵活光网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 1-2.



- 5 Buysse J, Georgakilas K, Tzanakaki A, *et al.*. Energy-efficient resource-provisioning algorithms for optical clouds[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(3): 226-239.
- 6 Contreras L M, López V, De Dios O G, *et al.*. Toward cloud-ready transport networks[J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2012, 50(9): 48-55.
- 7 Pickavet M, Vereecken W, Demeyer S, *et al.*. Worldwide energy needs for ICT: The rise of power-aware networking[C]. *Advanced Networks and Telecommunication Systems*, 2008: 1-3.
- 8 Zhang Yinfa, Ren Shuai, Wang Peng, *et al.*. Research progress of effect of high power signal on optical networks and protection technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 100003.  
张引发, 任 帅, 王 朋, 等. 大功率光信号对光网络的影响及防护技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 100003.
- 9 Vicat-Blanc P, Figuerola S, Chen X, *et al.*. Bringing Optical Networks to the Cloud: An Architecture for a Sustainable Future Internet[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- 10 O'Mahony M J, Simeonidou D, Hunter D K, *et al.*. The application of optical packet switching in future communication networks[J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2001, 39(3): 128-135.
- 11 De Leenheer M, Thysebaert P, Volckaert B, *et al.*. A view on enabling-consumer oriented grids through optical burst switching[J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2006, 44(3): 124-131.
- 12 Hou Rui, He Tingting, Mao Tengyue. Burst-segmentation-based and path-correlation-considered controlled retransmission scheme in optical burst switching networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706025.  
睿 侯, 何婷婷, 毛腾跃. 光突发交换网络中基于突发包分片并考虑路径关联的可控重传方案[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706025.
- 13 Jino M, Tsukishima Y. Virtualized optical network (VON) for agile cloud computing environment[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2009: OMG1.
- 14 Velasco L, Klinkowski M, Ruiz M, *et al.*. Elastic spectrum allocation for variable traffic in flexible-grid optical networks[C]. *National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America*, 2012: JTh2A. 39.
- 15 Zhang G, Leenheer M D, Mukherjee B. Optical grooming in OFDM-based elastic optical networks[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012: OTh1A. 1.
- 16 Stevens T, De Leenheer M, Develder C, *et al.*. Multi-cost job routing and scheduling in grid networks[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2009, 25(8): 912-925.
- 17 Ming L, Yinfa Z, Shuai R, *et al.*. Research on the resource joint scheduling in optical networks for cloud computing[C]. *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), IEEE*, 2014: 596-599.
- 18 Wang Y, Jin Y, Guo W, *et al.*. Joint scheduling for optical grid applications[J]. *Journal of Optical Networking*, 2007, 6(3): 304-318.
- 19 Aoun R, Gagnaire M. Service differentiation based on flexible time constraints in market-oriented grids[C]. *Global Telecommunications Conference, IEEE*, 2009: 1-8.
- 20 Abosi C E, Nejabati R, Simeonidou D. Service oriented resource orchestration in future optical networks[C]. *Computer Communications and Networks (ICCCN), IEEE*, 2011: 1-6.
- 21 Zhao Y, He R, Yang H, *et al.*. Data center application oriented control architecture in multi-domain optical networks[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4260-4265.
- 22 Lee Y, Bernstein G, So N, *et al.*. Research proposal for cross stratum optimization (CSO) between data centers and networks[OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-lee-cross-stratum-optimization-datacenter-00>.
- 23 Liu X, Wei W, Yu X, *et al.*. Distributed computing task assignment and lightpath establishment (TALE)[C]. *High-Speed Networks Workshop, IEEE*, 2007: 16-20.
- 24 Zervas G, Escalona E, Nejabati R, *et al.*. Phosphorus grid-enabled GMPLS control plane (G MPLS): Architectures, services, and interfaces[J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2008, 46(6): 128-137.
- 25 Williams J. NASA Nebula in action: Cloud computing case examples[OL]. <http://nebula.nasa.gov/blog/2011/08/16/white-paper-nebula-action>, 2011.
- 26 Belter B, Martinez J R, Aznar J I, *et al.*. The GEYSERS optical testbed: A platform for the integration, validation and demonstration of cloud-based infrastructure services[J]. *Computer Networks*, 2014, 61: 197-216.
- 27 Tzanakaki A, Anastasopoulos M, Georgakilas K, *et al.*. Planning of dynamic virtual optical cloud infrastructures: The

- GEYSERS approach[J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(1): 26–34.
- 28 Martini B, Martini V, Baroncelli F, *et al.*. Application-driven control of network resources in multiservice optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(2): A270–A283.
- 29 Zervas G S, Martini V, Qin Y, *et al.*. Service-oriented multigranular optical network architecture for clouds[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(10): 883–891.
- 30 Channegowda M, Nejabati R, Simeonidou D. Software-defined optical networks technology and infrastructure: Enabling software-defined optical network operations (Invited)[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A274–A282.
- 31 Simeonidou D, Nejabati R, Azodolmolky S. Enabling the future optical internet with OpenFlow: A paradigm shift in providing intelligent optical network services[C]. Proc of the 13th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks, 2011: 1–4.
- 32 Chowdhury N M, Boutaba R. A survey of network virtualization[J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862–876.
- 33 Wang A, Iyer M, Dutta R, *et al.*. Network virtualization: Technologies, perspectives, and frontiers[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(4): 523–537.
- 34 Fischer A, Botero J F, Till Beck M, *et al.*. Virtual network embedding: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1888–1906.
- 35 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.
- 36 Basta A, Barla B, Hoffmann M, *et al.*. Failure coverage in optimal virtual networks[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013: OTh3E. 2.
- 37 Zhang Q, Xie W, She Q, *et al.*. RWA for network virtualization in optical WDM networks[C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: JTh2A. 65.
- 38 Tzanakaki A, Anastasopoulos M P, Georgakilas K N. Dynamic virtual optical networks supporting uncertain traffic demands (invited)[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A76–A85.
- 39 Nejabati R, Escalona E, Peng S, *et al.*. Optical network virtualization[C]. Optical Network Design and Modeling (ONDM), IEEE, 2011: 1–5.
- 40 Jinno M. Virtualization in optical networks: From elastic networking level to sliceable equipment level[C]. Optical Internet (COIN), IEEE, 2012: 61–62.
- 41 Jinno M, Takara H, Yonenaga K, *et al.*. Virtualization in optical networks from network level to hardware level (Invited)[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A46–A56.
- 42 Zhang S, Shi L, Vadrevu C S K, *et al.*. Network virtualization over WDM and flexible-grid optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2013, 10(4): 291–300.
- 43 Gong L, Zhu Z. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks[J]. J Lightwave Technol, 2013, 32(3): 450–460.
- 44 Peng S, Nejabati R, Simeonidou D. Role of optical network virtualization in cloud computing (invited)[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A162–A170.
- 45 Anastasopoulos M P, Tzanakaki A, Simeonidou D. Stochastic planning of dependable virtual infrastructures over optical data center networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(9): 968–979.
- 46 Georgakilas K N, Tzanakaki A, Anastasopoulos M, *et al.*. Converged optical network and data center virtual infrastructure planning[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(9): 681–691.
- 47 Anastasopoulos M P, Tzanakaki A. Adaptive virtual infrastructure planning over interconnected IT and optical network resources using evolutionary game theory[C]. Optical Network Design and Modeling (ONDM), IEEE, 2012: 1–5.
- 48 Tzanakaki A, Anastasopoulos M P, Zervas G S, *et al.*. Virtualization of heterogeneous wireless-optical network and IT infrastructures in support of cloud and mobile cloud services[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(8): 155–161.
- 49 Yang H, Zhao Y, Zhang J, *et al.*. Multi-stratum resource integration for OpenFlow-based data center interconnect (invited)[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A240–A248.
- 50 Zhao Y, Zhang J, Yang H, *et al.*. Data center optical networks (DCON) with OpenFlow based software defined networking (SDN)[C]. Communications and Networking in China (CHINACOM), IEEE, 2013: 771–775.
- 51 Zhao Y, He R, Chen H, *et al.*. Experimental performance evaluation of software defined networking (SDN) based data



- communication networks for large scale flexi-grid optical networks[J]. Opt Express, 2014, 22(8): 9538–9547.
- 52 Zhang J, Yang H, Zhao Y, *et al.*. Experimental demonstration of elastic optical networks based on enhanced software defined networking (eSDN) for data center application[J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26990.
- 53 Zuo X, Feng Y, Jin Y. OptoVisor: An infrastructure-as-a-service framework based on virtualization of optical network[C]. SPIE/OSA/IEEE Asia Communications and Photonics, International Society for Optics and Photonics, 2011: 83101.
- 54 Hou W, Guo L, Liu Y, *et al.*. Virtual network planning for converged optical and data centers: Ideas and challenges[J]. IEEE Network, 2013, 27(6): 52–58.

栏目编辑: 王晓琰