

面向云计算的光网络虚拟基础设施规划研究

张引发 李明* 任帅 王鲸鱼 王坤

中国人民解放军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,联合光网络资源和数据中心资源的虚拟基础设施规划是解决光网络所面临挑战的最佳方法。建立了带波长转换能力和不带波长转换能力的两种虚拟基础设施规划的整数线性规划模型。采用动态业务请求,以最小联合能耗和最小网络资源使用率为目标函数,仿真比较了两种整数线性规划模型的能耗和阻塞率性能。结果表明,在轻负载情况下,最小联合能耗具有较低的能耗;在重负载情况下,最小网络资源使用率具有较低的能耗;而最小网络资源使用率始终具有较低的阻塞率。

关键词 光通信; 光网络; 虚拟基础设施规划; 能耗; 阻塞率

中图分类号 TN913.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP52.050604

Virtual Infrastructure Planning in Optical Networks for Cloud Computing

Zhang Yinfa Li Ming Ren Shuai Wang Jingyu Wang Kun

Laboratory of Optical Communication, Chinese Peoples Liberation Army, Xi'an Communications Institute, Xi'an, Shaanxi 710106, China

Abstract In the era of big data and cloud computing, the virtual infrastructure planning converged optical network resources and data center resources is the best way to solve the challenges facing optical networks. Two integer linear program models for virtual infrastructure planning are established with and without wavelength conversion capability. With dynamic service request, two objective functions of the two models: minimum joint power consumption and minimum network resource utilization rate, are simulated and compared with the power consumption and the blocking rate performance. The results show that, under light load conditions, the minimum joint power consumption has lower power consumption; under heavy loads, the minimum network resource utilization rate has lower power consumption; the minimum network resource utilization rate always has a lower blocking rate.

Key words optical communications; optical networks; virtual infrastructure planning; power consumption; blocking rate

OCIS codes 060.4250; 060.4256; 060.4254; 060.4264

1 引言

如今,人们已经进入了一个崇尚数据的大数据时代,而光网络正是解决大数据问题的灵魂。分析预测,到2020年,超过80%的基础设施都会被云包围^[1]。云计算时代,客户已经不再满足于点对点的光路服务^[2-3],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、大规模、高性能的网络来实现用户和数据中心(DC)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^[4],使它成为了云计算的最佳承载网络。

在云计算时代,光网络所面临的最大挑战是光网络资源和数据中心资源按用户需求一体高效调度的问题。越来越多的研究人员开始着手解决这一问题。光网络虚拟化技术通过对底层物理光网络的抽象,按不同用户需求组成性能各异的虚拟光网络,能够实现光网络资源的按需和高效调度。Tzanakaki等^[5]考虑到虚

收稿日期: 2014-11-28; 收到修改稿日期: 2015-01-09; 网络出版日期: 2015-04-24

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

作者简介: 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等方面的研究。

E-mail: yinfazhangxy@163.com

*通信联系人。E-mail: limingxy@163.com

拟光网络请求的不可预测性,对虚拟光网络周期性重构做了研究。Peng等^[6]提出了两种分别针对单线率和混合线率网络场景的虚拟光网络构成算法,其特点是能够实现物理层损伤感知。Zhang等^[7]针对传统的波分复用系统(WDM)光网络和灵活栅格光网络,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。以上研究虽然有效解决了按需和高效调度的问题,但是没有把光网络资源和数据中心资源联合考虑。最近,虚拟基础设施(VI)规划受到越来越多的关注,这里的虚拟化指的是光网络资源和数据中心资源的联合虚拟化,这种方法被认为是解决光网络面临云计算挑战的最佳方法。这方面的研究国内外都属于刚起步阶段。Peng等^[8]分析了光网络虚拟化在云计算时代的作用,提出了一种带有错误回溯功能的联合虚拟化方案。但该方案没有考虑运维成本的优化。Hou等^[9]简要分析了在虚拟基础设施规划中的挑战与方法,特别是提出了一种在断电恢复场景下的虚拟基础设施规划方案。但该方案没有考虑到光网络资源的利用率。

针对这种情况,本文分别考虑有波长转换(WWC)和无波长转换(WOWC)的两种波分复用光网络场景,以最小联合能耗(MJP)和最小网络资源使用率(MNR)为优化目标,采用整数线性规划(ILP)方法,对联合光网络和数据中心的虚拟基础设施规划做了相关研究。

2 能耗模型

2.1 光网络模型

光网络可以视为一个图,由一系列光链路 L 和光节点 N 组成。每个节点都是基于光交叉矩阵的光交叉连接设备(OXCs),支持 M 条输入和 M 条输出光纤,每条光纤的最大波长数为 W 。图1为一个OXC结构^[10],其中无源器件包括多路复用器(MUX)和多路解复用器(DEMUX);有源器件包括光交叉矩阵、每个输入/输出端口的掺铒光纤放大器(EDFA)、在每个输出波长端口的光电光振荡器(OEO)、每条光路都有一对光电(E/O)发射机(Tx)和光电(O/E)接收机(Rx)。WWC光网络有OEO,WOWC光网络无OEO。假设业务占用端口数用输入光纤数 M 乘以波长数 W 计算,节点的分叉能力为通过业务量的50%。

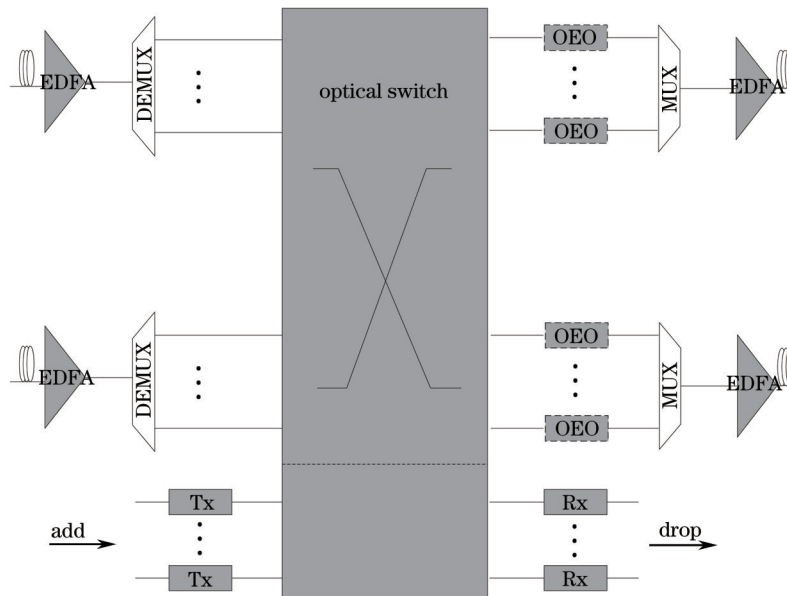


图1 光交叉连接模型

Fig.1 Optical cross-connect model

图2为连接OXCs的光链路模型^[11]。考虑到数据中心间互连光纤所具有的长距离、高速率特性,本文链路模型为按一定间距有序交替的单模光纤(SMF)和色散补偿光纤(DCF),在每条链路的开头和结尾处分别设置了前置色散补偿光纤(PRE)和后置色散补偿光纤(POST),并且在每传输间距的末尾处设置了EDFA来补偿衰减。



图2 光链路模型

Fig.2 Fiber link model

2.2 数据中心模型

数据中心中的主要服务器模块参照文献[12],它是一个硬件平台的全机架部署,并且是真实商用的数据中心,相关性能参数如表1所示。参照文献[13],假设数据中心的吞吐量 T_{DC} 为 2.4 Tb/s。

表1 数据中心构件模块的规格参数表

Table 1 Data center building block characteristics

Resource	Type	Capacity
CPU	30 servers/360 cores	2.93 GHz Intel Xeon six-core processor
Storage	-	2.9 TB
T_{DC}	-	2.4 Tb/s
Memory	1333 MHz	40 Tb

2.3 光网络能耗模型

光网络的总能耗由 OXC 和光链路的能耗决定。图1和图2中的深色部分分别代表 OXC 和光链路的主要耗能器件。OXC 能耗 P_{OXC} 由四部分决定:交换光纤能耗 P_{SF} 、传输器能耗 P_{transm} 、波长转换器能耗 P_{conv} 、放大器能耗 P_{ampl} ,表2为所需光网络设备的简单描述和典型能耗值^[14-15]。其中四部分能耗关系可通过(1)~(4)式计算:

$$P_{SF} = p_{total} \times P_{port_pair} = (p_{th} + p_{a/d}) \times P_{port_pair}, \quad (1)$$

$$P_{transm} = p_{a/d} \times P_{Tx/Rx}, \quad (2)$$

$$P_{conv} = p_{th} \times P_{transponder}, \quad (3)$$

$$P_{ampl} = (f_{in} + f_{out}) \times P_{EDFA}, \quad (4)$$

式中 p_{total} 表示总的光端口数, p_{th} 表示光交叉矩阵的端口数, $p_{a/d}$ 表示连接发射机 Tx 和接收机 Rx 的光端口数。在图2中,光链路的唯一能耗就是按传输间距部署的 EDFA。考虑到数据中心间光网络的长距离特性,这里假设放大间距 d_{span} 为 80 km。光链路 l 的能耗 P_l 是由链路长度 l_{length} 决定的,表达式如下:

$$P_l = \left[\frac{l_{length}(l)}{d_{span}} \right] P_{EDFA}. \quad (5)$$

表2 光网络设备能耗数据表

Table 2 Optical network equipment power consumption data

Symbol	Description	Power /W
P_{port_pair}	Input/output port pair of the switch fabric	0.107×10^{-3}
$P_{transponder}$	O/E/O line-side WDM transponder (10 G)	6
$P_{Tx/Rx}$	E/O, O/E transmitter or receiver	3.5
P_{EDFA}	EDFA	13

综上,总的光网络能耗为

$$P_{net} = \sum_{n \in N} P_{OXC_n} + \sum_{l \in L} P_l. \quad (6)$$

2.4 数据中心能耗模型

本文只考虑数据中心的基本能耗和满负荷运载时的能耗,其他的诸如制冷、电源分配等能耗不属于本文的研究范畴。数据中心的能耗可以参照文献[12]中的最大能耗值,见表3。在文献[16]中,作者研究了服务器的载荷与能耗的关系,发现服务器功耗在基本功耗的基础上随着业务载荷的增加而线性增长至满载功耗,通过(7)式计算。

$$P_{DC} = P_{idle} + (P_{busy} - P_{idle})u_s, \quad (7)$$

式中 P_{idle} 表示没有服务器被利用时数据中心在空闲状态下的基本能耗, P_{busy} 表示数据中心满负荷运载时的能耗, 假设空闲状态比满负荷运载时能耗少 50%, u_s 代表数据中心 s 的利用率, u_s 用波长衡量, 定义为被数据中心服务的总的光路请求与数据中心吞吐量 T_{DC} 的比值, 即

$$u_s = \frac{n_s}{T_{\text{DC}}}. \quad (8)$$

表3 数据中心能耗值

Table 3 Date center power consumption values

Symbol	Description	Value /kW
P_{busy}	Power consumption under full utilization	17.5
P_{idle}	Power consumption under idle state	8.75

3 问题建模

本文用整数线性规划方法来解决虚拟基础设施的规划问题, 并把这一问题视为一种特殊的路由波长分配问题。文中的物理基础设施(PI)包括了数据中心设备及与它们互连的光网络, VI是指由PI中的部分资源组成的一种逻辑上的资源的集合。用户的服务请求包含一定的数据中心资源需求和光网络资源需求。把用户的请求抽象为VI请求, VI规划指的是按照用户的VI请求对虚拟基础设施资源到物理基础设施资源进行映射的过程, 即用PI的一个子网来承载用户的VI请求, 实际上是一种对底层PI进行资源分配的过程。

3.1 WWC光网络场景

用有向图 $G=(N,L)$ 表示光网络拓扑, 其中 N 代表光节点集合, L 代表有向光链路集合。 S 是 N 的子集, 代表与数据中心相连的光节点。 D 代表VI请求集合。把这些请求按目标函数进行优化处理, 优化结果就是在网络拓扑和联合基础设施资源两方面进行VI到PI的最优映射, 光网络和DC状态会在每一个VI请求处理完后进行更新, 接着处理下一个到来的VI请求。

给定PI中DC一定的容量(计算资源, 存储资源), 并且给定一定的光网络容量(带宽资源), 来满足相应的业务需求。这些业务需求的目的是利用数据中心的容量, 对这些业务提供服务的同时要消耗光网络资源和数据中心资源的容量, 用数据中心吞吐量 T_{DC} 和光网络波长速率 R_w 来实现两种资源在定量上的统一, 这两种资源间的关系如(9)式所示, 可以计算出能够满足数据中心吞吐量 T_{DC} 的波长数 k 。

$$k = \frac{T_{\text{DC}}}{R_w}. \quad (9)$$

每一个VI请求 $d \in D$, h_d 表示需求容量, 假设 h_d 为波长级粒度。用 l 表示物理链路, 其中 $l=1, \dots, L$; e 表示虚拟链路, $e=1, \dots, E$ 。由于物理链路集合 L 代表图 G 中的所有有向链路, 所以它可以直接得到。虚拟链路集合 E 是图 G 中的节点集合 N 以严格网状网形式互联形成的链路集合。 n 表示光网络节点, 其中 $n=1, \dots, N$; s 表示DC节点, 其中 $s=1, \dots, S$; d 表示需求, 其中 $d=1, \dots, D$; q 表示物理候选路径, 其中 $q=1, \dots, Q_e$; p 表示虚拟候选路径, 其中 $p=1, \dots, P_d$ 。

任何能够满足需求容量的DC都是候选的目的节点, 从每一个源节点到所有满足业务需求的候选节点, 使用 k 条最短路径算法, 产生相应的候选物理路径表和候选虚拟路径表。

使用参数 δ_{edp} 表示面向需求 d 产生的候选虚拟路径 p 在转化为虚拟链路 e 时的匹配情况, 即

$$\delta_{edp} = \begin{cases} 1, & \text{if candidate virtual path } p \text{ of demand } d \\ & \text{is used to realize virtual link } e \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (10)$$

因为需要映射虚拟资源到物理资源, 所以使用另一个参数 γ_{leq} 表示相关物理路径 q 转化为虚拟链路 e 时的匹配情况, 即

$$\gamma_{leq} = \begin{cases} 1, & \text{if physical link } l \text{ is the part of the candidate} \\ & \text{physical path } q \text{ of the virtual link } e \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (11)$$

表4总结了经过ILP处理后的变量, 表示满足业务请求的资源分配情况, 并且提供了虚拟资源和物理资

源之间的映射关系。

表4 问题变量

Table 4 Problem variable

Variable	Domain	Description
x_{dsp}	Z_+	Flow realizing number of lightpaths requests of demand d towards DC s on candidate virtual path p
z_{eq}	Z_+	Flow realizing virtual link e on candidate physical path q
w_e	Z_+	Number of wavelengths utilized on virtual link e
y_l	Z_+	Number of wavelengths utilized on physical link l

优化目标分别是最小网络资源使用和最小联合能耗,参考第2节中的能耗模型,网络资源使用 N_R 和联合能耗 J_p ,这两个目标函数分别可表示为

$$N_R = \sum_l w_l \times l_{\text{length}}(l), \quad (12)$$

$$J_p = \sum_s [(1-f_s)P_{\text{idle}} + (P_{\text{busy}} - P_{\text{idle}})u_s] + \sum_n \sum_{l \in w^+(n)} \left[(1-\alpha_l)P_{\text{link}} + \alpha_l P_{\text{link}} \left(\frac{w_l}{\sum_l \Lambda_l} + 1 \right) \right] + \sum_n \sum_{l \in w(n)} \frac{1}{2} w_l P_{\text{Tx/Rx}} + \sum_n \sum_{l \in w^-(n)} w_l P_{\text{transponder}}, \quad (13)$$

式中

$$P_{\text{link}} = \sum_n \sum_{l \in w^-(n)} \frac{1}{W} w_l \left(\left\lfloor \frac{l_{\text{length}}(l)}{d_{\text{span}}} \right\rfloor + 2 \right) P_{\text{EDFA}}, \quad (14)$$

$$f_s = \begin{cases} 1, & \text{if DC } s \text{ is already used by another VI,} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (15)$$

$$\alpha_l = \begin{cases} 1, & \text{if link } l \text{ is already used by another VI,} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (16)$$

式中 w_l 表示在链路 l 中业务请求的波长数, $l_{\text{length}}(l)$ 表示链路 l 的长度, $w(n)$ 、 $w^+(n)$ 、 $w^-(n)$ 分别代表节点 n 所连接的所有链路集合、节点 n 的输出链路集合、节点 n 的输入链路集合, Λ_l 表示在先前建立的 VIs 上链路 l 被占用的波长数。(13)式中,光链路的能耗按以下方式计算:当一个 VI 第一次使用一条链路,这条链路的总能耗就被全部分配到这个 VI。当超过一个 VI 共同使用了这条相同的链路,这些 VIs 根据占用的波长比例分配相应比例的能耗。

为确保所有的需求都会被服务,给出 ILP 的约束条件:

$$\sum_s \sum_p x_{dsp} = h_d, \quad d = 1, \dots, D. \quad (17)$$

下面的三个约束针对虚拟链路容量 w_e 和物理链路容量 y_l ,它们必须满足所有光路请求,即

$$\sum_d \sum_s \sum_p \delta_{edp} x_{dsp} \leq w_e, \quad e = 1, \dots, E, \quad (18)$$

$$\sum_q z_{eq} \leq w_e, \quad e = 1, \dots, E, \quad (19)$$

$$\sum_e \sum_q \gamma_{leq} z_{eq} \leq y_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (20)$$

为确保数据中心 s 的使用情况被二进制变量 f_s 准确表示,需满足

$$\sum_d \sum_p x_{dsp} \leq f_s T_{DC}, \quad s = 1, \dots, S. \quad (21)$$

3.2 WOWC 光网络场景

WOWC 场景下进行 ILP 与 WWC 场景相比,优化目标相同,只不过由于存在波长连续性限制,要增加一个代表光纤中特定波长的参数 λ 。代表用候选虚拟路径 p 支持需求 d 并使用数据中心 s 服务的变量现在要变为 $x_{dsp\lambda}$,其表明路径中分配了一个特定的波长。同样,变量 z_{eq} 变为 $z_{eq\lambda}$ 。其他的参数设置和 WWC 场景相同。如下所示:

$$\sum_s \sum_p \sum_\lambda x_{dsp\lambda} = h_d, \quad d = 1, \dots, D, \quad (22)$$

$$\sum_d \sum_s \sum_p \sum_\lambda \delta_{edp} x_{dsp\lambda} \leq w_e, \quad e = 1, \dots, E, \quad (23)$$

$$\sum_q \sum_\lambda z_{eq\lambda} \leq w_e, \quad e = 1, \dots, E, \quad (24)$$

$$\sum_e \sum_q \sum_\lambda \gamma_{leq} z_{eq\lambda} \leq y_l, \quad l = 1, \dots, L, \quad (25)$$

为确保每一个实现虚拟链路 e 的物理路径 q 中的每一个特定波长只被分配了一个光路请求,需满足:

$$\sum_q \gamma_{leq} z_{eq\lambda} \leq 1, \quad e = 1, \dots, E, \quad l = 1, \dots, L, \quad \lambda = 1, \dots, \Lambda. \quad (26)$$

为确保数据中心 s 的使用情况被二进制变量 f_s 准确表示,需满足:

$$\sum_d \sum_p \sum_\lambda x_{dsp\lambda} \leq f_s T_{DC}, \quad s = 1, \dots, S. \quad (27)$$

4 仿真分析

通过一个动态业务提供模型对两种 VI 规划策略分别在 WWC 和 WOWC 光网络场景下进行仿真。假设一个联合光网络和数据中心的基础设施拓扑结构如图 3 所示,其基于 COST 239 pan-European 网络^[17],每条光纤可以双向通信,最大波长数为 96。假设有 4 个 DC 与其相连,根据(9)式,每个 DC 的吞吐量为 240 波长。仿真基于 Matlab,每个业务容量为 30 到 150,并以泊松过程到达,持续时间服从指数分布,业务粒度为一个波长,业务请求的源节点从除了与数据中心直接相连的节点外随机产生。假定要构建 4 个 VI,业务需求使每个 VI 支持 150 光路请求,因此 4 个 VI 共支持最高 600 光路请求。其中 WOWC 光网络场景由于波长连续性限制,要用到首次命中波长分配算法。

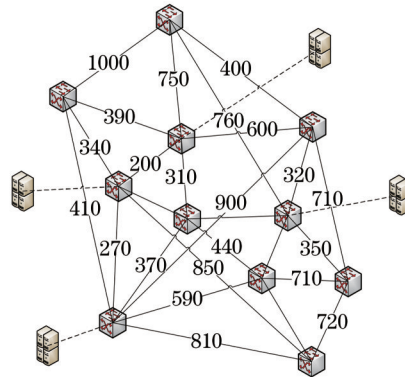


图 3 基于 COST-239 的联合光网络和数据中心基础设施

Fig.3 COST-239-based converged network and data center infrastructure

4.1 能 耗

图 4(a)表明了 WWC 光网络场景下,分别在 MJP 和 MNR 目标函数下进行 VI 规划,在不同光路请求数下的 4 个 VI 的总能耗及 DC 和光网络的各自单独能耗。通过图 4(a)可以看出在 120 和 240 光路请求时(相当于 30 和 60 光路每 VI)MJP 比 MNR 有更低的总能耗,在 360 光路请求时 MJP 与 MNR 有相似的总能耗,在 480 和 600 光路请求时 MJP 比 MNR 总能耗更高。这说明在低负载的情况下,MJP 比 MNR 产生的 VI 有更好的节能效果,然而随着负载量的升高相对的节能效果逐渐减弱,甚至反而比 MNR 更耗能。

分别观察光网络和 DC 的能耗能够清楚地解释为什么 MJP 相对 MNR 并没有在所有负载值下都展现出更优的能耗表现。图 4(a)中随着光路请求数的增加,MJP_Net 的能耗比 MNR_Net 的能耗始终要高。通过图 4(b)可以说明原因,这是由于 MJP 比 MNR 使用的平均光路长度更长,导致了相应光网络能耗的增加。图 4(a)中在低负载情况下,MJP_DC 的能耗比 MNR_DC 的能耗值低,随着光路请求数的增加两种能耗趋于相同。图 4(c)表明了光路请求数与数据中心使用数的关系,可以很好地解释这一点。由于 DC 的能耗在联合基础设施能耗中所占的比极大,所以 MJP 的原理就是尽可能少地增加 DC 的使用数量,只有在 DC 因为容量限制无法满足新的业务请求时才会使用新的 DC,相应地导致了较高的平均光路长度,也即过度利用了光网络资源。另一方面,MNR 获得了更好的网络资源利用率,因为它的目标是最小化网络资源(波长数)使用

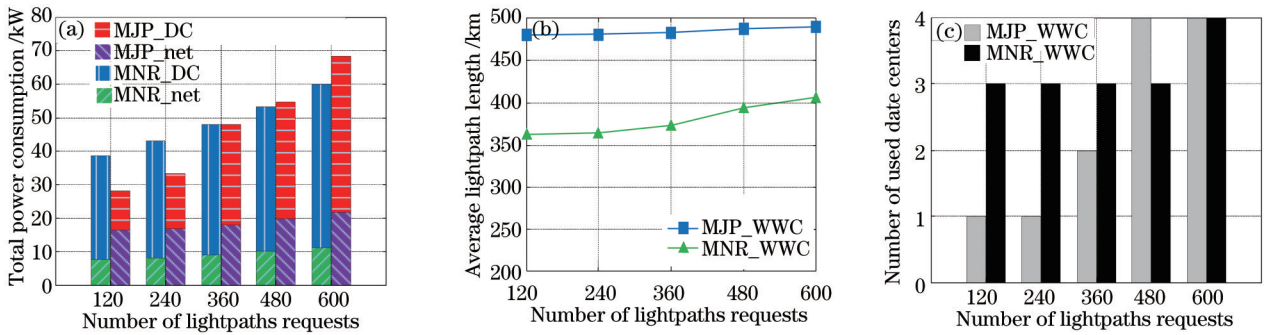


图4 WWC光网络中(a)总能耗、(b)平均光路长度、(c)使用的数据中心数

Fig.4 (a) Total power consumption, (b) average lightpath length and (c) number of used data centers in WWC

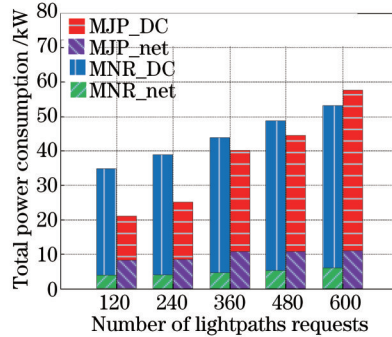


图5 WOWC光网络中总能耗

Fig.5 Total power consumption in WOWC

量,也即最小化光路长度。综上所述,图4(a)中光路请求数为600的高负载情况下,虽然MNR和MJP的所有4个DC都要被使用,但是由于MNR所用的平均光路长度较短,所以在总能耗方面相对更节能。

在图5中,表明了WOWC光网络场景下的总能耗情况,可以发现其与WWC光网络场景下的结果有相同的趋势。其中与WWC光网络场景相比,总能耗相对数值较低是由于缺少波长转换器引起的,而它正好能够显著地减少光网络的能耗。

4.2 阻塞率

图6表明了两个目标函数下进行VI规划后,PI中就链路波长利用数而言的网络资源利用情况。无论对于哪种光网络场景,MNR的网络利用率约为3%~13%,而MJP的网络利用率约为8%~27%,较小的网络资源利用率正是MNR的优化目标。

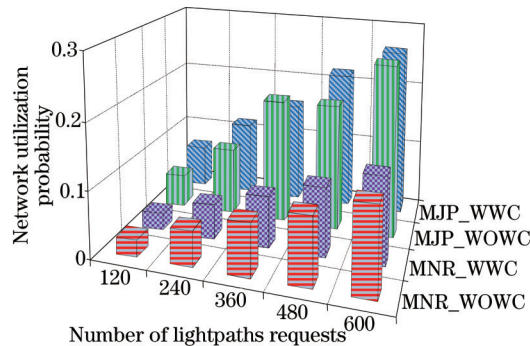


图6 网络利用率

Fig.6 Network utilization probability

图7(a)表明了WWC场景中的两种VI规划策略下的网络的阻塞性能。重点考虑最低网络资源利用的MNR目标下,对VI请求的阻塞率达到了6%左右。而考虑高效节能的MJP目标虽然在节能方面优于MNR,但如图6和图4(b)表明,MJP为了达到更好的节能效果,选择了更长的光路长度,利用了更多的底层光网络资源,所以在80光路请求数时对VI请求的阻塞率达到了21%。

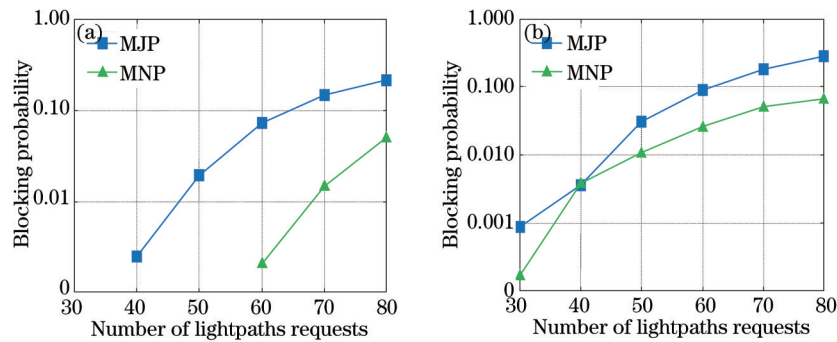


图7 (a) WWC; (b) WOWC光网络中阻塞率

Fig.7 Blocking probability in (a) WWC; (b) WOWC

图7(b)表明了WOWC场景中的两种VI规划策略下的网络的阻塞性能,相比图7(a),MNP目标下对VI请求阻塞率升到了8%,MJP目标下对VI请求的阻塞率升到45%。这是由于在波长连续性限制下,每个VI请求都将经历更高的网络阻塞。

5 结 论

对在联合光网络和数据中心的PI上实施VI规划进行了深入的研究。分别考虑WWC和WOWC两种光网络场景,建立了两种VI规划的ILP模型。并在两种模型下,分别比较了两种不同的目标函数——MJP和MNP。采用动态业务请求进行仿真分析,结果表明,在轻负载情况下MJP具有较低的能耗,在重负载情况下,MNP具有较低的能耗;而MNP始终具有较低的阻塞率。该研究能够解决光网络在大数据云计算时代所面临的挑战,对未来光网络建设具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- Nelson M R. The next generation internet, e-business, and e-everything[C]. 25th Anniversary AAS colloquium of Science and Technology Policy, 2010.
- 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.
- Wang Yeheng. Ultra broadband optical fibers and ultra broad telecom systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080606.
汪业衡. 极宽频带光纤和极宽频带通信系统[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080606.
- Zhang Yinfa, Ren Shuai, Liao Xiaomin, *et al.*. Study on high power inter-channel crosstalk attack in optical networks [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080607.
张引发, 任 帅, 廖晓闽, 等. 光网络中大功率带间串扰攻击研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080607.
- Tzanakaki A, Anastasopoulos M P, Georgakilas K N. Dynamic virtual optical networks supporting uncertain traffic demands(Invited)[J]. J Opt Commun Netw, 2013, 5(10): A76-A85.
- Peng S, Nejabati R, Simeonidou D. Impairment-aware optical network virtualization in single-line-rate and mixed-line-rate WDM networks[J]. J Opt Commun Netw, 2013, 5(4): 283-293.
- Zhang S Q, 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.
- Peng S, Nejabati R, Simeonidou D. Role of optical network virtualization in cloud computing(Invited) [J]. J Opt Commun Netw, 2013, 5(10): A162.
- Hou Weigang, Guo Lei, Liu Yejun, *et al.*. Virtual network planning for converged optical and data centers: Ideas and challenges[J]. IEEE Network, 2013, 27(6): 52-58.
- Murakami M. Analyzing power consumption in optical crossconnect equipment for future large-capacity optical networks[J]. J Networks, 2010, 5(11): 1254-1259.
- Katrinis K M, Jzanakaki A. On the dimensioning of WDM optical networks with impairment-aware regeneration[J]. IEEE/ACM Trans Netw, 19(3): 735-746.
- Oracle exalogic elastic cloud X2-2 data sheet[OL]. 2011 <http://www.oracle.com/us/products/middleware/exalogic/>

- exalogicelasticcloud-datasheet-2012885.pdf.html.
- 13 Orade exadata database machine X2-8[OL]. 2012, <http://www.oracle.com/technetwork/database/exadata/dbmachine-x2-8-datasheet-173705.pdf>.
 - 14 Aleksic S. Analysis of power consumption in future high-capacity network nodes[J]. *J Opt Commun Netw*, 2009, 1(3): 245-258.
 - 15 Tzanakaki A, Katrinis K, Politi T, *et al.*. Dimensioning the future pan-European optical network with energy efficiency considerations[J]. *J Opt Commun Netw*, 2011, 3(4): 272-280.
 - 16 Fan X, Weber W D, Barroso L A. Power Provisioning for a Warehouse-Sized Computer[M]. San Diego: 34th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 2007: 13-23.
 - 17 Batchelor P, Daino B, Heinzmann P. Study on the implementation of optical transparent transport networks in the European environment—Results of the research project COST 239[J]. *Photonic Network Commun*, 2000, 2(1): 15-32.

栏目编辑: 王晓球