

基于网络资源虚拟化的 集成式虚拟光网络映射机制研究

孙 卿¹ 朱 敏² 李贵鑫¹

(1. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要 光网络虚拟化技术可以为多个高性能的网络应用提供专用的网络资源, 是一种光网络资源配置的有效共享机制. 本文提出了一种新颖的集成式虚拟光网络映射 iVONE 机制, 其中节点映射和链路映射以集成方式交错执行. 这与现有的分步式 VONE 方案完全不同, 即在节点映射完成之后再执行链路映射. 而且, 在光网络资源可虚拟化的平台上, 我们也设计了一种新颖的路由, 频谱, 子载波和调制器分配 RMS²A 算法, 来为虚拟链路建立光路. 通过仿真证明了, 所提出的算法比现有的分步式 VONE 算法在堵塞率上具有更好的性能, 此外还对网络性能的影响因素进行了研究.

关键词 弹性光网络; 网络资源虚拟化; 虚拟光网络映射

中图分类号 TN915.6

文献标识码 A

0 引言

近年来, 下一代新型互联网应用, 如大数据、云计算等逐渐兴起. 这些应用请求通常要求专有的网络资源和网络接入模式, 以保证其特定的网络服务质量. 为此, 光网络虚拟化技术被认为是一种很有潜力的为下一代新型互联网应用提供服务的技术. 该技术可以在一个公共的底层物理网络上为多个虚拟光网络(Virtual Optical Network, VON)请求提供资源配置服务. 其中, 每一个 VON 请求由几个虚拟节点(Virtual Nodes, VNs)和相互连接的虚拟光链路(Virtual Optical Links, VOLs)组成的. 这种 VON 请求被映射到底层物理网络的过程, 就是虚拟网络映射(Virtual Optical Network Embedding, VONE)问题, 包括节点映射和链路映射. 具体地说, 每一个 VN 映射到一个底层物理节点(Substrate Node, SN)上, 即节点映射; 而链路映射的问题就是将每一条 VOL 映射到底层物理光路上, 它由一条或多条物理光纤链路构成.

如何设计合理的 VONE 机制, 将多个 VONs 合理地映射到底层物理网络上, 共享多种网络的资源, 包括节点中资源和链路上资源等, 这个问题的研究得到越来越多的关注. 在近些年, 光网络虚拟化技术的工作原理和关键性实现技术已经受到了详细的阐述^[1,2]. 在文献[3]中, 作者在波分复用光网络(Wavelength Division Multiplexing, WDM)中, 假设所有物理节点上部署了足够多的波长转换器, 在此情况下研究最优虚拟网络映射的静态问题, 提出了混合整数线性规划模型和两种贪心启发性算法. 在文献[4]中, 作者设计了一种意识到 WDM 网络物理层损伤机制的 VONE 算法. 文献[5]研究了 WDM 网络中透明 VONE 问题, 主要针对链路映射问题, 作者提出了多个整数规划模型. 最近, 多个研究已经表明, 在灵活栅格的弹性光网络(Elastic Optical Network, EON)中的 VONE 会变得更加灵活且高效^[6,7]. 在文献[6]中, 作者对弹性光网络中的 VONE 问题进行了研究, 但仅仅考虑链路映射问题, 而忽略节点映射问题. 在文献[7]中, 作者提出了两种分步式启发性 VONE 算法, 也就是在第一步每一个 VON 请求的所有 VNs 都映射完成之后, 再进行第二步相应的 VOLs 映射.

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771134)资助

通讯作者: 朱敏, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 光网络, E-mail: minzhu@seu.edu.cn.

通过对已有工作的分析,我们发现传统的分步式 VONE 机制并没有考虑到节点映射和链路映射两部分之间的内在联系;而且也没有考虑网络 SNs 中的调制器和子载波资源的配置情况.在本文中,我们考虑在网络资源可虚拟化的情况下,即全面考虑 SNs 中的子载波资源、调制器资源和 SFLs 中频谱资源的情况下,提出了一种新型的集成式虚拟网络映射机制(integrated VONE, iVONE),并和传统的分步式虚拟网络映射机制进行了比较,进一步分析了网络性能的影响因素.

1 问题描述

我们使用 $G^s(N^s, L^s)$ 来建立底层弹性光网络 EON 模型,其中 N^s 代表 SN 的集合, L^s 代表 SFL 的集合.在每个物理节点上,我们部署了一系列虚拟光收发器(Virtualized Transponders, vTPs),由此构建两个虚拟资源池:光子载波池和光调制器池.我们标记物理网络中每条 SFL 的频率槽(frequency slots, FSs)的最大数目为 B^s 个.为了形象地表示 SFL 链路上频谱槽资源的占用情况,我们定义了一个二进制数组变量 b_l^s .当 $b_l^s[i] = 1$ 时,代表链路 l^s 的第 i 个 FS 已被占用了;否则 $b_l^s[i] = 0$.值得注意的是,物理节点中的光子载波资源池所能够产生子载波范围与 SFL 上有频谱槽范围保持一致.因此,我们用 b_n^s 这个二进制数组变量来定义物理节点 SN 中的子载波资源,数组的长度也等于 B^s ,即每个 SN 中的子载波池所能产生光子载波的最大数量也为 B^s .当 $b_n^s[j] = 1$ 时,意味着节点 n^s 上第 j 个子载波已经被占用来传输/接收信号;反之 $b_n^s[j] = 0$.

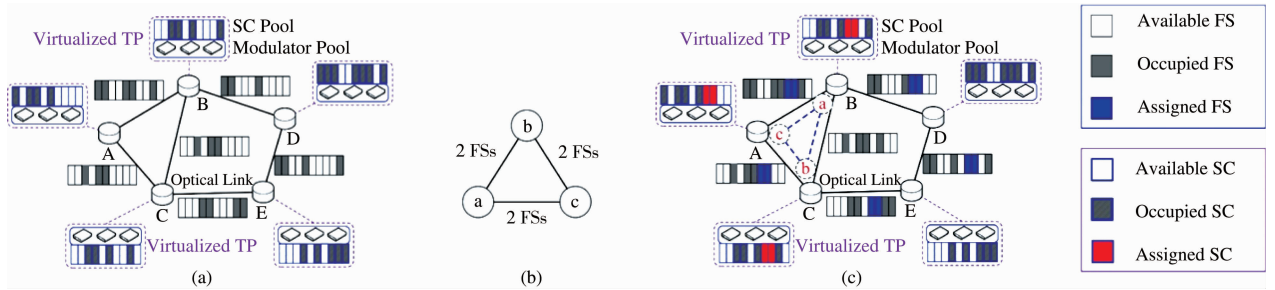


图1 透明的 VONE 示意图 (a) 底层 EON 网络拓扑 (b) VON 请求 (c) 透明的 VONE 结果

对于 VON 请求而言,我们用 $g^{vi}(N^{vi}, L^{vi})$ 来建立模型,用符号 $b(g^{vi})$ 来标记 VON 请求的比特率带宽要求.图 1 分别给出了底层 EON 网络拓扑结构, VON 请求以及透明的 VONE 结果的实例.

2 集成式虚拟网络映射机制

在阐述我们提出的集成式虚拟网络映射 iVONE 机制之前,我们分别设计了一种虚拟辅助图(Virtual-Auxiliary-Graph, VAG)算法和一种新颖的路由、调制格式、子载波、频谱分配(RMS²A)算法,这两个算法都是 iVONE 机制的重要组成部分.

2.1 VAG 算法

针对每一个待处理的 VON 请求,首先根据该请求所采用的第 k 种类型调制格式的频谱利用率 $SU(m^k)$ (bit/s/Hz) 以及一个频谱槽 FS 的频谱范围 C_{slot} (Hz),将 VON 请求的比特率要求 $b(g^{vi})$ 转换成所需要的频谱 FS 的数量 $bw(g^{vi})$,如公式(1)所示,其中 N_{GB} 表示保护带宽所需要的 FS 数量.

$$bw(g^{vi}) = \lceil \frac{b(g^{vi})}{SU(m^k) \times C_{slot}} \rceil + N_{GB}. \quad (1)$$

然后,根据所求的 FS 频谱数 $bw(g^{vi})$,按照 FS 标号从小到大,逐层扫描网络中所有 SNs 上的子载波占用情况 $b_n^s[i]$ 和所有 SFLs 上频谱占用情况 $b_l^s[i]$,将底层物理网络转换成多层 VAG 子图.具体来说,为了建立第 f 层 VAG 子图, VAG 算法将分别检查在每一个 SN n^s 中是否存在从第 f 到 $(f + bw(g^{vi}) - 1)$ 的连续可用的子载波资源块,以及在每一条物理光纤链路 SFL l^s 上是否存在从第 f 到 $(f + bw(g^{vi}) - 1)$ 的连续可用的频谱槽资源块.如果在 n^s 中和 l^s 上都存在这些资源块,那么 n^s 和 l^s 都将被嵌入到第 f 层 VAG 中,表示为 G_{sub}^f .相反, n^s 和 l^s 都将会从 G_{sub}^f 上移除.

表 1 VAG 构建算法

输入: 底层物理网络 $G^s(N^s, L^s)$, 第 i 个请求的 FS 频谱数 $bw(g^{is})$, f 为 VAG 子图的标号	
输出: G_{sub}^f 为第 f 层 VAG 子图	
1	初始化 $G_{sub}^f = G^s$
2	获得所有物理节点 SN 子载波和物理光纤链路 SFL 频谱槽的资源占用情况
3	For 所有的物理光纤链路 SFL $l^s \in L^s$ in G^s do
4	If $\sum_{j=f}^{f+bw(g^{is})-1} b_{l^s}^j[i] > 0$
5	在第 f 层 VAG 子图中删除该条物理光纤链路 SFL $l^s \in L^s$;
6	End
7	End
8	For 所有的物理节点 SN $n^s \in N^s$ in G^s do
9	If $\sum_{j=f}^{f+bw(g^{is})-1} b_{n^s}^j[i] > 0$;
10	在第 f 层 VAG 子图中删除该物理节点 SN $n^s \in N^s$;
11	End
12	End

2.2 RMS²A 算法

该 RMS²A 算法将第 f 层 VAG 子图 G_{sub}^f 中, 在新的备选物理节点 u^s 与现已被映射的物理节点 w^s 之间建立满足条件的光路. 首先, 我们需要获得第 k 种类型调制器 m^k 的传输距离 $TR(m^k)$. 然后在 VAG 子图 G_{sub}^f 上, 为物理节点对 (u^s, w^s) 选择三条最短物理光路径, 且路径的传输距离不能超过其限制 $TR(m^k)$. 如果存在多个备选光路, 该算法将选择其中具有最短传输距离的备选光路 p_{can_minL} ; 如果传输距离最短的备选光路不止一条, 那么最终将选择其中路径频谱利用率最低的物理光路 p_{can_minU} , 表 2 给出了 RMS²A 算法的详细步骤.

表 2 RMS²A 算法

输入: 第 f 层 VAG 子图 G_{sub}^f , 采用的第 k 种调制格式 m^k , 现已被映射的物理节点 w^s , 以及新的备选物理节点 u^s	
输出: 虚拟链路 VOL 的映射状态标识符 VOLS	
1	初始化 VOLS = SUCCEDED;
2	获得第 k 种调制格式 m^k 的最大传输距离 $TR(m^k)$;
3	在第 f 层 VAG 子图中, 求取物理节点 w^s 和 u^s 之间不超过最大传输距离限制的若干条最短路径;
4	If 仅仅存在一条这样的路径
5	将这条路径确定为备选路径 p_{can} ;
6	End
7	If 存在多条这样的路径
8	则将最短长度的路径确定为备选路径 p_{can_minL} ;
9	If 相同的最短长度路径 p_{can_minL} 也存在多条可选;
10	则将其中路径资源利用率最低的路径确定为备选路径 p_{can_minU} ;
11	End
12	End
13	If 没有找到任何备选路径
14	Return (VOLS = FAILED);
15	End
16	Return (VOLS)

2.3 iVONE 算法

基于上述提出的 VAG 和 RMS²A 算法, 我们设计了动态 iVONE 算法, 该算法能够以间插的方式来执行节点映射和链路映射. 具体来说, 当一个新的虚拟节点 VN 尝试映射到一个物理节点上时, iVONE 算法首先从所有没有被标记的(即还未被 VON 请求映射的)物理节点集合中, 获取一个新的物理节点 u^s 作为虚拟节点的备选映射节点. 然后, 再检测该新的备选物理节点 u^s 与现已被标记的(即已被该 VON 请求映射的)物

理节点 w^s 之间,是否需要建立光路,也就是检测这个新的 VN 和该 VON 请求中其他已经成功映射的 VN 之间是否存在 VOL. 若存在这样一个 VOL 子集,则调用 RMS²A 算法,立即对该子集中所有存在 VOL 进行链路映射. 只有当子集中所有 VOL 都映射成功,该新的物理节点 u^s 才可确定为该虚拟节点的最终映射节点. 相应地,上述子集中所有 VOL 也都完成链路映射. 否则,一旦子集中某一条 VOL 映射失败,则重新选择另外一个物理节点 u^s 作为该虚拟节点的备选映射节点,重复上述的检测过程. 值得一提的是,在我们的 VOL 链路映射过程中,物理节点 SN 中子载波资源的限制也被考虑.

3 仿真性能分析

在动态仿真过程中,我们假设每一个 VON 请求都经历了从产生到结束的过程,即相继随机到达,在网络中保持其一段生命周期时间后,离开网络并释放其占用的资源. 我们也假设光网络物理节点 SN 中虚拟化调制器池,包含 4 种类型的光调制器 BPSK、QPSK、8QAM 和 16QAM,各种类型的调制器数量为 100. 每种类型光调制器所能支持的最大无失真传输距离分别设置为 9600、4800、2400、1200 km. 底层物理网络中每条 SFL 上的频谱槽总数为 320,每一个频谱槽的频谱范围 C_{slot} 为 12.5 GHz. 当选择使用 BPSK 调制格式时,我们假设频谱利用率为 1bit/s/Hz,则每一个频谱槽 FS 所能承载的带宽容量为 12.5 Gb/s. 仿真中采用的网络拓扑图 14 节点的 NSFNET,如图 2 所示.

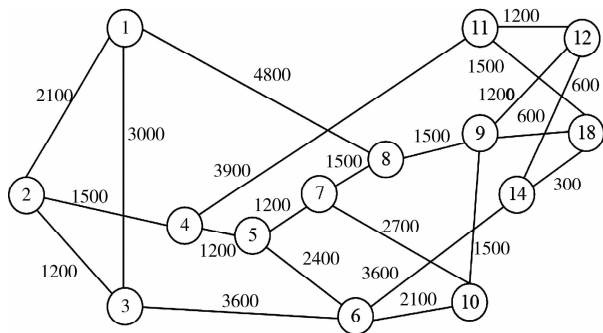


图 2 NSFNET 网络拓扑

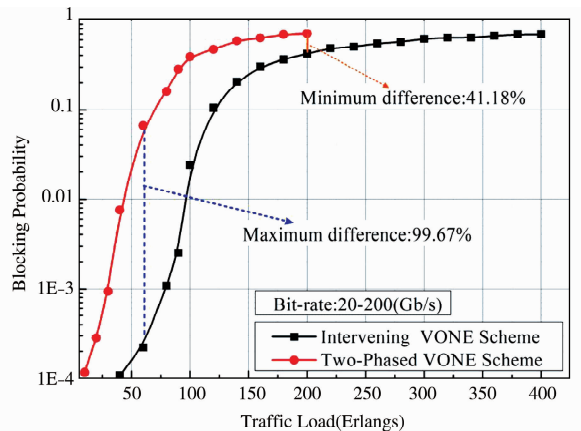


图 3 提出的算法和传统的分步式算法在堵塞率上的比较

我们采用了文献^[7]中所提出的传统的分步式算法(Two-Phased VONE)作为基准算法. 图 3 给出了集成的 iVONE 算法和分步式 VONE 算法在请求堵塞率上的比较结果. VON 请求的比特率变化范围为 $[20, 200]$ Gb/s. 从图 3 中可以观察到,在相同的业务负载条件下,iVONE 算法能够非常有效地降低堵塞率,尤其在较低业务负载时,堵塞率差距较大. 这是因为 iVONE 算法在网络资源利用率更具优越性,从而改善了请求堵塞率. 另外,我们也可以观察到随着业务负载的增加,两种算法在堵塞率上的差距越来越小,这主要是因为随着业务负载的增加,网络资源越来越紧张,包括节点内部的子载波和调制器的资源,无法满足新到达的 VON 请求,因此请求堵塞率越来越大.

如图 4 所示,针对我们提出的 iVONE 机制,对网络堵塞率的影响因素进行了分析. 在仿真过程中,所随机产生的 VON 请求的具体比特率范围分别设置为 $[20, 40]$, $[40, 80]$, $[80, 120]$, $[120, 160]$, $[160, 200]$ Gb/s. 从图 4 中不难发现,总体而言,网络堵塞率仍然随着业务负载的增加而上升. 当业务负载达到一个特定值时,堵塞率也趋近于一个饱和值,即趋于稳定. 这是因为当业务负载较高时,底层物理网络中已经没有足够可用的虚拟资源来满足业务需求,尤其是网络调制器资源已被用尽,这时网络堵塞率将保持一个较高水平. 同时也发现,当而每种类型的调制器数量翻倍时,即从 100 增加到 200 时,VON 请求的堵塞率将大幅降低,因为网络中有更多可用的调制器来服务这些请求. 此外,当每种类型的调制器数量为 100 时,VON 请求的比特率变化,并没有让堵塞率表现出明显的差异. 在这种情况下,调制器资源成为了影响堵塞率的主要限制因素. 当每种类型的调制器数量增加到 200,此时调制器资源较为充裕,不再成为堵塞率的主要影响因素,其他资源的限制将会体现出来. 在相同业务负载条件下,VON 请求的比特率越小,堵塞率则越低. 这是因为

VON 请求的比特率越低,意味着它所需要的子载波和频谱槽数量就越少,将会有更多可用的网络资源服务下一个 VON 请求。

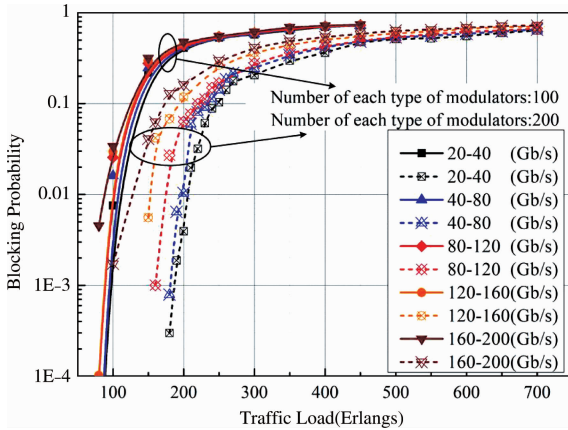


图 4 网络堵塞率的影响因素分析

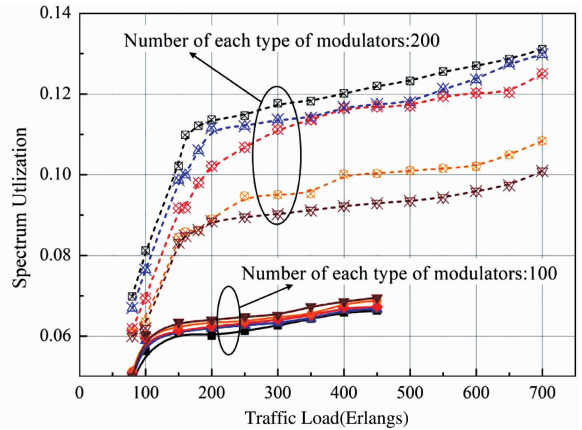


图 5 频谱利用率的影响因素分析

图 5 给出了不同业务负载下,底层物理网络的频谱利用率.当每种类型的调制器数量为 100 时,随着 VON 请求比特率的变化,频谱利用率并没有明显的差异.当每种类型的调制器数量翻倍为 200 时,相同业务负载下的频谱利用率有了非常显著的增加.这是因为在调制器资源较少时,它会变成影响堵塞率的主要限制因素.另外一个现象是当 VON 请求的比特率较低时,对应的频谱利用率往往较高.产生这种现象的原因是较低比特率的 VON 请求往往只需要更少的子载波和频谱槽资源,物理节点上的子载波资源和 SFLs 上的频谱槽资源更容易被利用,产生资源碎片的可能性也相对更少,这将有助于提高网络的频谱利用率。

4 结论

本文所提出的集成式 iVONE 机制相比于传统的分步式 VONE 机制,考虑了节点映射和链路映射的内在联系,以间插交错执行的方式完成虚拟网络映射.同时在虚拟网络映射过程中,也考虑了光网络资源虚拟化,将节点内部收发器资源虚拟化为光子载波资源池和光调制器资源池,并且建立了物理节点 SN 中子载波资源与物理光纤链路 SFL 上频谱槽资源之间的一一对应的关系.仿真结果表明,iVONE 机制能够很好地改善网络堵塞率,还分析了 VON 请求的比特率范围以及光调制器类型和数量对网络性能所产生的影响。

参 考 文 献

- [1] Nejabati R, Escalona E, Peng S, et al. Optical network virtualization[C]. // Asia Communications & Photonics Conference, 2013.
- [2] Jinno M. Virtualization in optical networks: From elastic networking level to sliceable equipment level [C]. // The 10th International Conference on Optical Internet (COIN2012).
- [3] Zhang S, Shi L, Vadrevu C S K, et al. Network Virtualization over WDM Networks [C]. // IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems & Networks, 2011.
- [4] Peng S, Nejabati R, Azodmolky S, et al. An Impairment-aware Virtual optical network composition mechanism for future internet [J]. OSA Optics Express, 2011, 19(26): B251-B259.
- [5] A Pagès, J Perelló, S Spadaro. Virtual network embedding in optical infrastructures [C]. // IEEE 14th Int Conf on Transparent Optical Networks (ICTON), Coventry, UK, 2012.
- [6] Yang T Y. Optimal allocation of virtual optical networks for the future internet [C]. // 16th International Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM), 2012.
- [7] Gong L, Zhu Z. Virtual Optical network embedding (VONE) over elastic optical networks [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 450-460.