


多租户 5G 传输网络的动态切片方法[邀请]

穆罕默德·雷汉·拉扎、马特奥·菲奥拉尼、艾哈迈德·罗斯塔米、彼得·奥伦、莱娜·沃辛斯卡和保罗·蒙蒂 

摘要—软件定义的网络允许网络提供商通过网络切片在多个租户之间共享其物理网络(PN)，其中在物理网络之上提供多个虚拟网络(VNs)。在这种情况下，可以通过引入高级编排功能来提高 PN 资源利用率，该功能可以根据 VN 资源需求的时间变化，在不同租户的片之间智能地分配和再分配资源。这是一个被称为动态切片的概念。本文用混合整数线性规划公式和启发式算法来解决动态切片问题。将动态切片的好处与静态切片进行比较，静态切片是一种不智能调整分配给每个虚拟网络的资源量的方法。仿真结果表明，与静态切片相比，动态切片可以将虚拟网络拒绝概率降低 1 个数量级以上。这有助于网络提供商接受更多虚拟网络进入他们的基础设施，并有可能增加他们的收入。动态切片的好处是以服务降级为代价的(即，当无法提供虚拟网络所需的所有资源时)，但本文表明，所提出的解决方案引入的服务降级水平非常小。

索引术语—5G 传输；动态切片；WDM 的知识产权；多租户网络；网络虚拟化；软件定义的网络。

1. 介绍

第五代移动网络(5G)有望支持各种服务(例如，增强的移动宽带、媒体传送、工业应用)，这些服务在延迟、容量和可靠性方面有自己的特定要求。这些服务将通过配备无线电、连接和云资源组合的同一物理网络(PN)基础架构提供。这意味着需要一个多用途、灵活且可编程的传输网络，能够动态地协调资源端到端的 ces, 2]。

手稿于 2017 年 7 月 12 日收到；2017 年 10 月 19 日修订；可接受的 2017 年 10 月 22 日；2017 年 12 月 13 日发布(Doc. ID 302237)。

米(meter的缩写) R. Raza(电子邮件:mrraza@kth.se)、L. Wosinska 和 P. Monti 在瑞典 Kista SE-164 40 Electrum 229 号瑞典皇家理工学院通信系统系工作。

米(meter的缩写) 费奥拉尼、a. 罗斯塔米和 p. 赫伦在瑞典基斯塔的爱立信公司工作。

<https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000A77>

软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)是拥有可编程和灵活的 5G 传输网络的有希望的使能因素。NFV[由于其实例化虚拟网络功能(VNFs)的能力]通过在传输网络的不同部分动态创建虚拟网络基础设施来提供灵活性。此外，SDN 引入了网络可编程性，允许提供商通过应用编程接口(API)控制他们的资源。此外，使用 SDN，可以通过网络切片的概念在不同租户之间共享相同的 PN 资源[3]，这又允许实现多用途传输平台。

通过网络切片，可以在相同的 PN 之上创建多个虚拟网络，并将其分配给不同的服务(即，通常每个服务一个虚拟网络)。每个虚拟网络是基于相应服务的特定需求而创建的，并且它被分配了一部分(即，一片)端到端 PN 资源。可以静态或动态地为每个虚拟网络分配资源。通过静态切片，每个虚拟网络在其整个服务时间内被分配固定部分的 PN 资源。该资源量通常对应于请求虚拟网络的服务的峰值需求。尽管静态切片很简单，但它并不能有效利用 PN 资源。如果服务的资源需求随时间变化，静态切片方法可能会导致 PN 资源的过度调配。因此，更常见的解决方案是动态切片。使用这种方法，在虚拟网络映射阶段，虚拟网络会被分配一个资源片，该资源片的资源刚好足以满足当前的服务需求。在存在时变服务需求的情况下，编排层可以决定(即，通过监控每个虚拟网络的资源需求)哪些虚拟网络需要更多的资源(因此切片向上扩展)，哪些虚拟网络不需要当前分配给它们的所有资源(因此它们可以暂时向下扩展)。虚拟网络之间的资源“再分配”过程仅限于基础设施层面。租户没有意识到这样一个事实，即他们的虚拟网络已经扩大/缩小，他们仍然像以静态方式分配资源一样管理资源。这当然是最理想的情况。实际上，可能存在虚拟网络扩展操作不是 100%成功的情况。因此，一些蚂蚁将经历服务退化。不同租户之间的资源共享有望提高 PN 资源利用率，并有可能增加

网络提供商的收入。尽管动态切片是一种更加灵活和资源高效的方法,但它需要更复杂的编排功能来动态重新配置 PN 资源。然而,这种机制可以通过使用基于 SDN 的控制平面来实现。

在我们之前的工作中,第一次评估了动态切片和静态切片的优势,在参考文献中给出。[4]. 动态切片问题(即虚拟网络映射加虚拟网络重构)被提出并公式化为混合整数线性规划(MILP)问题,尽管只给出了问题虚拟网络重构部分的 MILP 公式。此外,使用小的(即,具有 6 个节点)网络实例。最近,参考文献中的工作。[5]通过实验评估了联合或分等级(即在不同技术领域之间)分配给不同虚拟网络的资源片的扩大和缩小的好处。但是,在演示设置中,扩展/缩减切片的决定是由租户触发的,没有演示这方面的示例功能。

本文基于参考文献中提出的初步贡献。[4]并对 5G 传输网络中动态切片的优势进行了全面评估。更准确地说,本文提出了完全动态切片问题的 MILP 公式(即虚拟网络映射加虚拟网络重构)。此外,为了评估使用大型网络实例的动态切片的性能,提出了一种基于启发式算法的动态切片问题的解决方案。在小型网络场景中验证了所提出的启发式算法的性能后,使用更真实的 38 节点传输网络评估了动态切片的好处。仿真结果表明,与静态切片方法相比,动态切片方法有可能获得超过 1 个数量级的资源利用率。还发现服务退化水平非常低,对于网络提供商和租户来说都在可接受的水平之内。

II. 相关著作

已经对网络切片进行了大量研究,尤其是在基于互联网协议(IP)的网络中,其中大多数文献集中于如何映射虚拟网络探索成一个 PN,例如[6-8]。到目前为止,据我们所知,网络切片还没有一个通用的定义-

ing。在我们看来,片是网络提供商分配给租户的一组资源(物理或虚拟),而租户又拥有相应的物理资源。当新租户要求控制一组资源时,它会向网络提供商询问所需资源的描述。网络提供商则通过检查其物理资源的状态来满足这些要求。这种检查是否满足要求的过程相当于解决了虚拟网络映射/嵌入问题,其中虚拟网络请求描述了租户所需的一组资源。在这方面,网络切片和虚拟网络的供应

映射/嵌入问题是非常相似问题。另一方面,动态切片解决方案不仅仅是解决虚拟网络映射/重新配置问题。通过动态切片,租户可以获得程序自动 API 来控制所提供的切片。除此之外,从架构和功能的角度来看,动态切片还包括许多增强功能,使网络提供商的协调者能够在不同租户的切片之间智能地分配和重新分配资源,以便(i)更有效地使用基础架构资源,以及(ii)将每个租户经历的降级控制在可接受的水平。

光传输网络中的网络切片仍然是一个研究热点。该领域的大多数工作都考虑了设计问题,即假设所有虚拟网络请求都是预先已知的,目标是使用尽可能少的虚拟网络资源来确定能够嵌入所有请求的虚拟网络的规模[9, 10]。参考文献的作者。[9]提出了波分复用(WDM)和柔性网格光学 PNs 上 VN 映射的 MILP 公式和启发式算法。参考文献中的工作。[10]提出了一种在不透明光 PN 上映射 VNs 的策略,其中光信号可以在任何中间节点被终止并转换到电域。因此,对于给定的虚拟网络,不需要为每个虚拟链路分配相同(组)的波长。

动态虚拟网络映射请求中的网络切片问题最近引起了标准化机构、供应商和一般研究团体的关注。该方向最近的大多数研究都考虑了这样一种场景,其中要供应的虚拟网络请求不是先验已知的,并且它们动态地到达/离开网络。在这方面,参考文献中的工作。[11]引入了“切片即服务”的概念,展示了该功能在大多数 5G 用例中是如何至关重要的。参考文献的作者。[12, 13]提出了不同 SCE-nario 中动态虚拟网络供应的算法。参考文献中的工作。[12]研究如何通过基于正交频分复用(OFDM)的光 PN 动态服务于 VN 请求。参考文献还提出了一种多层光 PN 中动态 VN 映射的启发式算法。[13].

另一方面,参考文献中的作品。[14, 15]展示了动态虚拟网络供应概念的实验演示。参考文献的作者。[14]实验性地演示了一种多租户网络体系结构,该体系结构动态地提供一个片,该片的资源由请求它的租户完全控制。参考文献中的工作。[15]提出了一种多域资源代理,能够跨异质控制域[即,通用多协议标签交换(GMPLS)和 OpenFlow]和传输技术(即,光分组交换和弹性光网络)动态地提供虚拟光网络。

上述工作没有考虑到在虚拟网络映射完成后对其进行更改的可能性

供应到生产网络中,即虚拟网络重新配置概念。另一方面,参考文献中的作品。[16-18]

强调虚拟网络重新配置的必要性,以便有效利用虚拟网络资源,即,在无法提供新的虚拟网络请求后(即,由于虚拟网络中缺少资源),或者在虚拟网络出现故障后,可能需要重新配置虚拟网络。参考文献中的工作。[16]研究了在弹性光网络的情况下,当新的VN请求由于光纤链路中缺少子载波而被阻塞时,VN重新配置的好处。参考文献的作者。[17]提出一种虚拟网络重新配置算法,最大限度地减少虚拟节点迁移的次数,从而最大限度地减少虚拟网络承载的流量中断。此外,参考文献中的工作。[18]展示了动态虚拟光网络映射和重新配置的实验演示,其中后者在PN中的节点或链路故障之后执行。

参考文献的作者。[19]提出了MILP公式和启发式算法,用于提供集中式无线接入网(C-RAN)服务的移动运营商的虚拟网络的按需重新配置。在这项工作中,应租户的请求,网络提供商尝试重新分配分配给该特定租户的虚拟网络。通过利用特定时间点PN中可用的备用资源来重新配置虚拟网络。在这个过程中,编排者没有任何功能来从其他租户那里释放资源(目前可能不需要这些资源)来进一步提高基础架构利用率。另一方面,在本文设想的体系结构中,扩大/缩小租户份额的决定由协调者做出,反过来,协调者也能够根据需要在租户之间重新分配资源,以提高基础架构资源效率。参考文献中的工作。[20]是一个架构概念的证明,其工作方式与我们论文中设想的方式相似。在参考文献中。[20],指挥者(而不是租户)决定重新配置切片(因为拥塞的存在或PN中的故障)。另一方面,所提出的解决方案的主要特征之一,即在重新配置过程中在不同租户的片之间重新分配资源的可能性,没有被考虑。最后,参考文献中的工作。[21]强调了彻底研究动态切片相对于传统(即静态)方法(即动态放大/缩小切片)的优势的重要性。这样的研究在现有文献中是缺失的,而本文是第一篇评估动态切片好处的文章。更具体地说,目标是评估动态切片带来的好处是否足以证明控制平面复杂性的必要增加是合理的。具体而言,这项工作侧重于供应和维护网络切片的策略,考虑(i)租户虚拟网络请求的动态到达/离开,以及(ii)虚拟网络资源需求的时间变化。

III. 系统结构

图1展示了本文中考虑的系统架构,它由三个互连的技术领域组成。第一个域是WDM传输网络[22],它为其他两个域提供连接服务。这个传输网络是

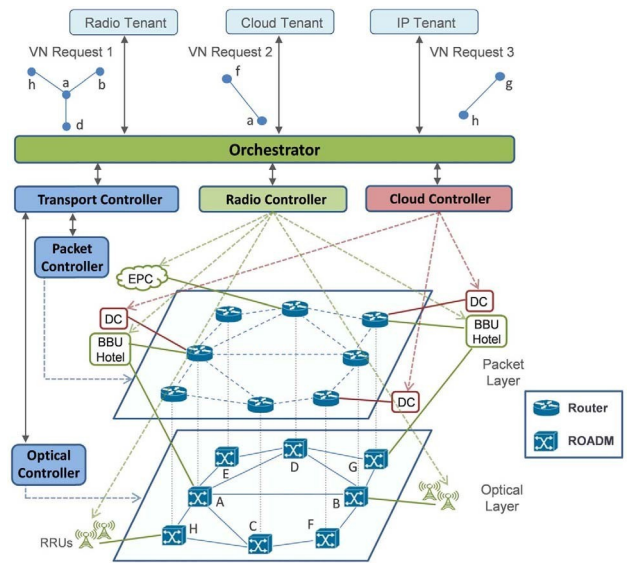


图1. 系统架构。DC, 数据中心; RRU, 远程无线电小组; BBU, 基带单元; EPC, 演进分组核心; 虚拟网络; 可重构光分插复用器。

由两层组成,即分组层和光层,每个层由各自的控制器管理。分组层由IP路由器组成,而光层由可重新配置的光分插复用器组成。通过光纤连接。假设每个

IP路由器与ROADM相连,在每个节点提供流量疏导[23]功能。传输控制器通过与分组和光控制器联合交互来管理分组和光层中的操作。

无线电领域使用多个长期演进(LTE)接入点提供移动宽带服务。它们是根据C-RAN概念[24]部署的,即RAN功能在远程无线电单元(rru)和基带处理单元(BBU)之间分配,后者位于BBU酒店,并使用公共无线电接口(CPRI)连接到rru。无线电域依赖于传输网络的连接服务来提供CPRI流。此外,无线电控制器负责执行RAN功能,包括(i)无线资源单元处的业务监控,(ii)它们的激活/配置,(iii)BBU资源的监控,以及(iv)如何将基站分配给无线资源单元。

云域由许多提供计算/存储服务的数据中心组成。云控制器负责管理DC资源,并在每个DC运营DC内部网络。云域还依赖于传输网络来互连分布式控制系统,例如,创建副本或在分布式控制系统之间进行同步。

在设想的架构中,网络提供商负责(i)切片供应和(ii)切片重新配置决策。这是在接入层的帮助下完成的,该接入层不仅执行无线电(即BBU酒店)、传输

(即包/光)和云(计算/存储)资源, 1 还包括服务的生命周期编排。后一个方面不在本文讨论范围之内。编排者还将关于 PN 资源的信息聚合成一个统一的抽象表示, 然后直接向租户应用程序公开(即使用编排者的北向接口)。反过来, 租户可以请求提供资源片。这是通过发出虚拟网络请求来完成的, 该请求包括 (i) 拓扑信息(即, 节点、链路), (ii) 对要通过虚拟链路和在虚拟节点中提供的资源的要求, 以及 (iii) 一些租户特定的约束(例如, 虚拟节点可能需要映射到某个 PN 节点)。协调器尝试将底层 PN 中的资源分配给每个虚拟网络请求, 并根据它们的可用性通知租户操作是否成功。

这项工作考虑了三种不同类型的租户, 即无线电、云和 IP。无线电租户在穿越具有足够可用端口的 BBU 酒店时, 要求无线资源单元和演进分组核心(EPC)之间的连通性(即容量)。云租户请求在一些分布式控制系统中分配云资源(即计算和存储资源), 而这些分布式控制系统又需要能够相互通信以进行数据交换。知识产权租户要求在互联网服务提供商接入点之间提供一定数量的带宽。

假设无线电和 IP 租户在白天有高峰再资源需求, 即他们的用户在白天更活跃。另一方面, 假设云租户在夜间达到高峰, 例如, 在分布式控制系统之间进行同步或复制。网络提供商可以利用不同租户的资源需求的这种时间变化来实现 PN 资源的有效利用。分配给每个租户的虚拟网络的资源量可以根据虚拟网络资源需求的变化进行动态调整, 即称为动态切片的概念。下一节将更详细地解释这个概念是如何工作的。

IV. 动态切片的概念

图 2 显示了来自两个不同租户的两个虚拟网络请求的资源需求的时间变化示例。租户 1 的 VN 请求在白天需要更多的 PN 资源, 而来自 tenant 2 的 VN 请求在晚上需要更多的资源。传统的分片方法将在每个虚拟网络的整个持续时间内为其分配固定数量的资源(即, 对应于峰值需求)。然而, 这样的方案将导致 PN 资源的不良利用。

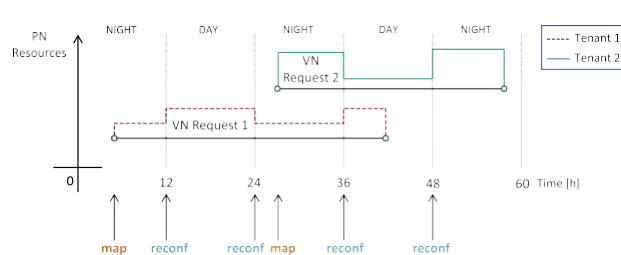


图 2。考虑两个不同租户的虚拟网络请求的动态切片。

更有效的方法是动态切片, 其中分配给每个租户的切片大小可以根据虚拟网络资源需求的变化而变化。使用动态切片, 在任何给定的时间段(即白天或晚上), 编排者可以决定缩减那些其虚拟网络不需要当前分配给它们的所有资源的租户的切片。同时, 这些新释放的资源可以分配给那些需要更多资源的虚拟网络。由于动态切片, 可以在不同的租户之间共享 PN 资源, 从而提高整体 PN 的使用效率。

本文中解决的动态切片问题由两部分组成(图 2): (i) 虚拟网络映射, 当需要提供新的虚拟网络请求时, 以及 (ii) 虚拟网络重新配置, 当所有虚拟网络的资源需求发生变化时(即, 在白天/晚上变化期间, 反之亦然), 需要对其切片进行放大/缩小。

虚拟网络映射阶段的输入根据虚拟网络资源需求进行描述。目标是找到一组满足这些要求的 PN 资源(链路容量和计算/存储单元)。为了最大限度地减少分配给给定虚拟网络的连接资源量, 建议的映射策略尝试将新的虚拟网络分配到已建立的光路上。如果不可能, 该策略会尝试添加最少数量的新光路, 以支持虚拟网络连接要求。如果 PN 没有足够的资源来满足新的虚拟网络请求的要求, 它将被拒绝。假设当新的虚拟网络请求被拒绝时, 不可能在稍后 PN 资源变得可用时映射它。

虚拟网络重新配置阶段尝试调整所有已调配虚拟网络的映射, 以匹配其随时间变化的资源需求。为那些需要比当前已签名的虚拟网络更少资源的虚拟网络释放资源。反过来, 这些新释放的资源被分配给那些资源需求增加的虚拟网络。虚拟网络重新配置阶段的目标是尽可能匹配虚拟网络资源需求的变化, 同时尽可能限制光路重新配置的数量, 即光路重新路由操作, 以便不中断在所提供的虚拟网络上运行的服务。这项工作假设随着时间的推移, 只有虚拟网络的虚拟链路容量需求会发生变化。

¹ orchestrator 做出的切片供应和重新配置决策基于从相应域控制器收集的可用资源信息。只要相应的控制器提供必要的资源信息, 我们设想的动态切片策略就可以工作, 并且不受编程器管理的技术任务数量的限制。

在虚拟网络重新配置阶段, 如果虚拟网络的资源片需要扩展, 可能会出现无法提供所有所需资源的情况 (例如, 如果网络处于高负载状态)。在这种情况下, 提供给租户的服务会降级。假设服务时间为 T 个时间单位的 VN 请求在时间 t_1 被接受, 总 VN 降级 D 由以下公式给出:

$$D = \frac{t_1 + T}{R} \frac{\sum_{i=1}^N C_{req}(t_i) - \sum_{i=1}^N C_{prov}(t_i)}{C_{prov}(t)}; \quad (1)$$

其中, $C_{req}(t)$ 表示所需的总容量, $C_{prov}(t)$ 表示 VN 所有链路在时间 t 提供的总容量 (图 3)。下一节描述动态切片过程的 MILP 公式。

V. 动态切片的 MILP 公式

本节介绍了上一节中描述的虚拟网络映射和虚拟网络重新配置阶段的 MILP 公式。

A. MILPmap

这个公式来自参考文献中的工作。[9, 25]. 移动设备管理应用程序执行虚拟网络请求到生产网络的映射, 而不删除或修改任何已经提供到生产网络的虚拟网络的映射。MILPmap 会考虑 PN 中当前建立的光路所使用的路由和容量。容量信息有助于 MILPmap 决定是否可以通过利用任何先前建立的光路来满足传入虚拟网络请求的容量要求。否则, MILPmap 会添加满足 VN 请求所需的最小数量的新光路。

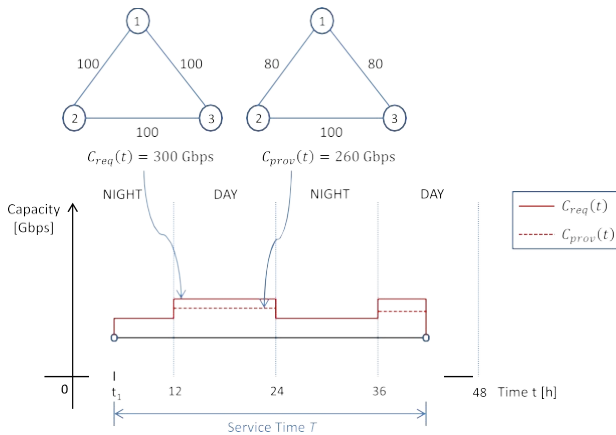


图 3. 服务时间为 T . $C_{req}(t)$ 的 VN 所需和提供的总容量, 总所需容量; $C_{prov}(t)$, 总提供能力; t_1 , VN 的到达时间。

等式中给出了 MILPmap 的目标函数。(2). 它旨在最小化 PN 中的波长资源使用。约束 (3) 确保云租户所需的计算/存储容量不超过所选分布式控制系统中的可用容量。约束 (4) 确保为无线电租户选择的 BBU 酒店有足够的 BBU 港口可用。约束 (5) 确保虚拟节点仅映射到一个 PN 节点。约束 (6) 确保同一虚拟网络中的两个不同虚拟节点不会映射到同一个 PN 节点。约束 (7) 和 (8) 约束输入 PN 中两个节点之间需要提供的总容量。约束 (9) 确保流量保持-

IP 层中的。约束 (10) 在映射传入的虚拟网络请求后, 计算每个光路上使用的总容量。约束 (11) 确保两个节点之间提供的容量不超过它们之间光路提供的容量。约束 (12) 确保光学层中的流动守恒。限制

(13) 确保光纤链路上建立的光路数量低于可用波长。此外, 值得一提的是, 放宽了波长连续性约束, 即假设每个 PN 节点配备有足够的转发器 (TPs), 以根据需要执行尽可能多的电-光和光-电转换。约束 (14) 确保先前建立的光路不能被移除或重新路由以适应到来的 VN 请求。

如果 MILPmap 导致不可行的解决方案, VN 请求将被拒绝。否则, MILPmap 生成以下输出: (i) VN 请求的节点映射, 即每个虚拟节点映射在 PN 中; (ii) VN 请求的链路映射, 即如何将每个虚拟链路的容量需求映射到 PN 中提供的光路中; 以及 (iii) PN 中所有光路使用的路径和容量。然后, MILPmap 输出信息用于更新 PN 资源当前状态的描述。一旦虚拟网络服务时间到期, 虚拟网络中相应的资源被释放, 并且虚拟网络资源使用信息被更新。如果在虚拟网络断开后, 光路上没有剩余的流量, 光路将被拆除。

B. MILPreconf

如前所述, 当虚拟网络的链路容量需求随时间变化时, 需要相应地调整其切片。因此, 所有当前映射的虚拟网络都需要重新配置, 以满足其新的需求。一些虚拟网络可能需要扩大其份额, 而其他虚拟网络可能需要更少的资源。MILPreconf 旨在找到一种最佳方式来扩大/缩小所有现有虚拟网络的资源片。在虚拟网络容量需求增加的情况下, MILPreconf 首先尝试重新调整现有虚拟网络映射的大小。如果这不可能, 它会尝试将虚拟网络重新映射到 PN 中已经存在的光路上, 或者新建的光路上。如果重新调整大小和重新映射都不成功, 则虚拟网络将降级, 降级值使用公式计算。(1).

米尔预函数的目标函数在等式中给出。(15). 它旨在最小化 (I) 当前映射在 PN 中的 VN 的退化, (ii) 光路重新配置的次数, 以及 (iii) 波长资源 $us-$ 年龄。 α 、 β 和 γ 是加权因子, $\alpha \gg \beta \gg \gamma$ 。约束 (16) 和 (17) 计算总容量

考虑到重新配置时当前映射到 PN 的所有虚拟网络, 在 PN 中的两个节点之间需要代理。考虑到一些虚拟网络可能会降级, 约束 (18) 确保了 IP 层中的流量守恒。约束 (19) 计算重新配置后每个光路上使用的总容量。约束条件 (20) - (22) 包括用于计算光路重新配置的次数。请注意, 约束 (21) 和 (22) 可以通过使用一组简单的线性约束来线性化, 如附录 a 所述

因素

五、当前映射在生产网络中的所有虚拟网络的集合

纳秒 PN 中的节点集

N_v 传入 VN 请求 v N_{bm} 中的一组虚拟节点 PN 中节点 m 的相邻节点集

虚拟节点 a 的所有候选节点的集合

ρ_{sd} 虚拟链路 $s-d$ 的容量要求

虚拟链路的容量需求

(同 $dollarcostaveraging$) 平均花费 虚拟

$bbua$ 虚拟节点 a 所需的 BBU 端口数量

DC_k PN 节点 k 的当前可用计算/存储容量

BBU_k PN 节点 k 的可用 BBU 端口的当前数量 PN 节点 I 之间光路上使用的容量

和 j 在调用 MILPmap 之前

颈内 PN 节点 I 和 j 之间的光路数量穿过链路 (m ; 在援引 MILP 之前

轮状病毒 VN v 的节点映射 (即虚拟节点 s 映射到 PN 节点 b), 用于 MILPreconf

PN 中每个链路可用的波长数

每个波长的容量

变量

耗牛 1 如果虚拟节点 a 映射到 PN 节点 k

x_{ij} PN 节点 I 和 j 之间的光路数量

$taij$ PN 节点 I 之间光路上使用的容量而 j 在解决了 MILP 之后

颈内 PN 节点 I 和 j 之间的光路数量穿过链路 (m ; n) 解决 MILP 后

颈内 齐吉与齐吉的区别

$ij \geq 1$ if zij 大于或等于 q_{ij}

uij PN 节点 I 和 j 之间光路重新配置的次数

ysb 和 yde 的 sd 异或 (即, 如果 ysb 和 yde 为 1

sd 1 如果虚拟链路 $s-d$ 的端点被映射到 PN 节点 $b-e$
 be 1 如果虚拟网络 v 的虚拟链路 $s-d$ 的端点被映射到 PN 节点 $b-e$
五: 其源和目的地被映射到 PN 节点 $b-e$ 的 VN v 的虚拟链路的退化
 be

v 需要从 PN 节点 b 供应到 e 的容量
 be

v 需要从对应于虚拟网络 v 的虚拟网络节点 b 到 e 调
 be 配的容量

成为 通过光路 $i-j$ 从 PN 节点 b 供应到 e 的容量
 ij 通过 VN v 的光路 $i-j$ 从 PN 节点 b 到 e 调配的容量

五: 成为
 ij MILPmap

目标:

$$ij \text{ } IA_0 \quad (2)$$

部

$$我: j \in N_s \quad m \in N_s; \quad n \in N_{bm}$$

制约因素: $x \quad y \times DC \leq DC; \quad \forall k \in n; \quad (3)$

$$ak \quad a \quad k \quad s \\ a \in N_v \\ x \quad y \times bbu \leq BBU; \quad \forall k \in n; \quad (4)$$

$$X = \\ 耗牛 \quad 1; \quad \forall \text{一个} \in NV; \quad (5)$$

$$k \in CNa \\ 耗牛 \leq 1; \quad \forall k \in ns; \quad (6)$$

$$a \in N_v$$

$$ysb + yde = GSD + 2 \quad HSD; \quad \forall; \quad d) \quad SdV;$$

是

$$\forall b; \quad e \in N_s: b \neq e; \quad (7)$$

$$(s) : dX \\) \in SD_v \quad (\rho \quad SD \times hbe) = 1be; \quad \forall b; \quad e \in N_s: b \neq e; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \begin{array}{l} \text{成为} \\ ij \end{array} & \begin{array}{l} \text{成为} \\ 吉 \end{array} & \begin{array}{l} 8 \\ < \end{array} & \begin{array}{l} 1be \\ \text{如果我} \\ \text{最好} \\ \text{如果我} \\ \text{否则} \end{array} & \begin{array}{l} ; \quad \forall b; \quad e; \quad I \in N_s: b \neq e; \\ 0; \end{array} & (9) \\ & \begin{array}{l} j \in N_s \\ j \neq i \end{array} & \begin{array}{l} j \in N_s \\ j \neq i \end{array} & \begin{array}{l} \text{成为} \\ ij \end{array} & \begin{array}{l} b; \\ e \in N_s \\ s \\ b \neq e \end{array} \end{aligned}$$

$$taij \leq C \times x_{ij}; \quad \forall \text{一世}; \quad j \in N_s: I \neq j; \quad (11)$$

$$8 > \\ x_{ij} \quad \text{如果 } m = i$$

$$ij \quad X \quad zij \\ X \\ Z = > < - \quad \text{如果 } m = j;$$

$$\begin{aligned} & x_{ij}; \\ & : \\ & > \quad \text{否则} \\ & O \\ & ; \end{aligned}$$

163 1. GET COMMON WITH A01 10 NO EXAMINER
泰晤 不同，否则为0)
rv 的异或 和房车

∀一世; j; m∈N:I≠j; (12)
s

不使用任何 TP 边缘。这导致路径中只有 LP 边。反过来，这导致在已经建立的光路上提供 c_p 。但是，如果在计算最短路径时选择了 TP 边缘，则必须建立新的光路来提供 c_p 。如果虚拟网络的所有虚拟链路都被成功提供，算法计算对应于节点映射 m 的 PN 中的平均波长数（即 u_m ）。最后，Heuristicmap 选择导致 u_m 最小值的节点映射选项 m 。请注意，复杂度更低、速度更快的启发式算法可以基于某种标准仅选择一个节点映射选项，然后仅针对所考虑的选项计算链路映射。另一方面，启发式地图计算链接映射

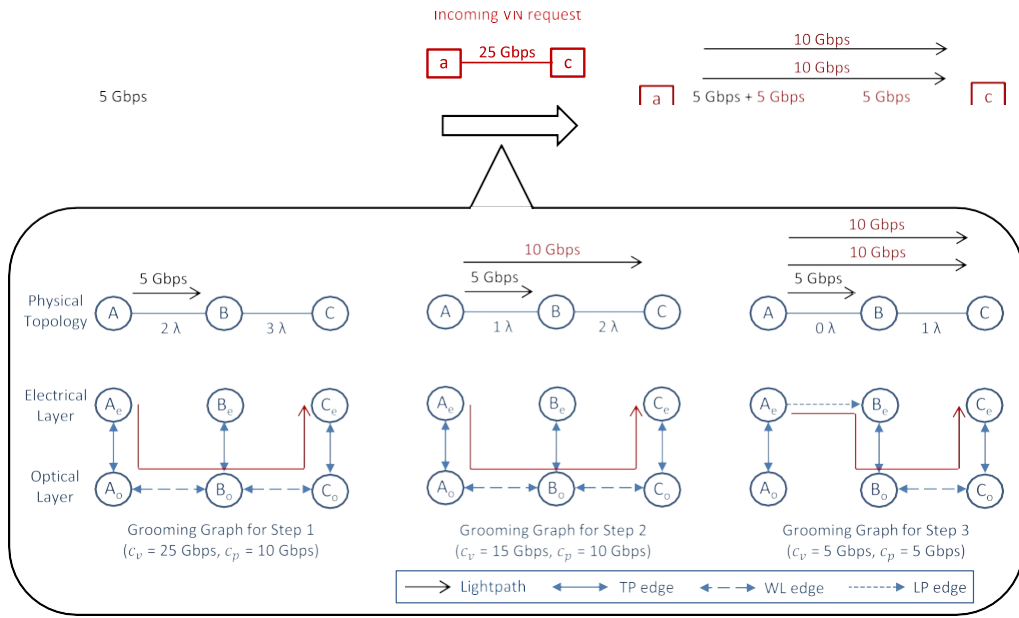


图 4. 如何使用整理图概念调配虚拟链路的示例(假设波长容量为 10 Gbps)。

以便找到在 PN 中使用最少资源的一个。

图 4 显示了如何为 PN 中从节点 A 到节点 C 的虚拟链路提供容量 c_v 25 Gbps 的示例, 每个链路中有三个波长, 每个波长为 10 Gbps。假设已经建立了一条从节点 A 到节点 B 的光路, 为其他虚拟网络传输 5 千兆位的流量。由于 c_v 大于 w , c_p 的值最初设置为 w , 即 10 Gbps。由于之前没有建立可以容纳 c_p 的光路, 因此在这一步修饰图中没有 LP 边。在电气层中找到从节点 A 到节点 C 的最短路径后, 即从 A_e 到 C_e (用红色突出显示), 为 c_p 建立新的光路。第二步, c_v 15 Gbps 和 c_p 10 Gbps。这个动作导致从节点 A 到节点 C 增加了另一条承载 10 Gbps 的光路。最后, 在第三步, c_v 5 Gbps。由于 c_v 小于 w , c_p 为 5 Gbps。在这种情况下, 从 A_e 到 B_e 存在一个 LP 边缘, 因为先前建立的光路可以容纳这个 c_p 值。然而, 由于链路中没有可用的自由波长, 因此在光学层中的相应节点之间没有 WL 边缘。因为从 A_e 到 C_e 的最短路径包含 LP 边, 所以 c_p 被整理为从节点 A 到节点的现有光路 B。然而, 从节点 B 建立了新的光路以容纳 c_p 。

算法 1 启发式地图

输入: PN init_state 的当前状态; 虚拟网络请求规范 (带有一组虚拟节点和虚拟链路) 输出: 虚拟网络最终状态的更新状态; 映射状态映射

1. 考虑每个虚拟节点的资源需求和候选列表, 计算所有可能的节点映射集合

2. 对于 M do 中的所有节点映射 M
3. 对于 V 中的所有虚拟链接
4. 而 $v \neq 0$ do 的容量需求 c_v
5. 如果 $c_v > \text{波长容量 } w$, 则
6. 要供应的容量 c_p w
7. 其他
8. 要供应的容量 c_p c_v
9. 如果...就会结束
10. 构造 c_p 的疏导图, 计算疏导图电气层中 v 的源和目的地之间的最短路径
11. 如果没有找到路径
12. 从集合 M 中移除 M
13. 继续步骤 2 中的下一个节点映射
14. 其他
15. 在计算路径上提供 c_p
16. c_v c_v CP
17. 如果...就会结束
18. 结束时间
19. 结束于
20. 计算 m 的平均波长使用量 um
21. 存储有关为 m 提供的光路的信息
22. 将 PN 恢复到初始化状态
23. 结束于
24. 如果 M 是空的, 那么
25. 映射失败
26. 其他
27. 映射成功
28. 从最小为 um 的 M 中选择节点映射选项 M
29. 根据选择的节点映射和相应的提供的光路更新 PN 最终状态
30. 如果...就会结束

B. 启发式

该算法用于使现有虚拟网络的映射适应其虚拟链路容量需求的时间变化。启发式算法在算法 2 中描述。当在白天和夜间之间切换时，该算法将每个当前建立的光路的使用设置为零，并将它们的路线信息存储在 PN 中。然后，Heuristicreconf 选择一个虚拟网络，并尝试首先调配具有最大容量需求的虚拟链路。容量需求被分成块（即，以 cp 为单位划分，如启发式算法的情况），并且以与图 4 中解释的相同的方式构建疏导图来预测每个 cp。在服务第一个数据块时，在梳理图中为 PN 中已经存在且其已用容量被设置为零的每个光路添加一个 LP 边。对于后续的块，这些光路的使用会相应地更新。通过将 LP 边的权重设置为比 TP 边的权重小得多的值，该算法试图在现有光路上提供新的虚拟链路容量需求。否则，如果根据整理图计算的路径包含 TP 边，则需要建立新的光路来服务 cp。如果在源和目的地之间找不到路径，相应的虚拟链路将被降级，降级量等于无法提供的容量。该算法继续以循环方式选择虚拟网络，并重复相同的过程，直到提供了所有需要的容量，或者无法重新配置的虚拟链路全部降级。

算法 2 启发式

输入: PN init_state 的当前状态; 当前映射的虚拟网络的集合; 每个虚拟网络的虚拟链路集 Vs 和更新的容量需求 cv; 每个虚拟链路的 $s \in Vs$; 每个虚拟网络的虚拟节点集 $N_s \in S$ 和映射-

PN 中每个虚拟节点的 ping $n \in N_s$

输出: PN final_state 的更新状态; 退化 dv; s

每个虚拟网络的虚拟链路 $v \in Vs$

1. 设置每个当前建立的光路的使用
归零
2. 初始化所有降级变量 dv; s 到零
3. 以循环方式从 S 中选择一个 VN s
4. 取最大容量需求 cv; s 表示 s 的虚拟链路 v, 对应的 dv; s 为零
5. 如果简历; $s > \text{波长容量 } w$
6. 要供应的容量 cp w
7. 其他
8. 要供应的容量 cp cvs
9. 如果...就会结束
10. 构建 cp 的梳理图, 并计算电层中 v 的源和目的地之间的最短路径(使用有关 PN 中端点映射位置的信息)
11. 如果没有找到路径
12. dv; s 简历; s
13. 其他
14. 在计算路径上提供 cp
15. cv; s = cvs CP

16. 如果...就会结束

17. 根据提供的光路更新 PN 最终状态

18. 再次重复步骤 3, 选择下一个虚拟网络, 直到无法再调配更多容量

VII. 性能赋值

动态切片的性能是以静态切片方法为基准的。如前几节所述, 在静态切片的情况下, 每个虚拟网络都使用 MILPmap (对于使用小型网络的比较) 或 Heuristicmap (对于使用大型网络的比较) 映射到 PN。这是在考虑到峰值容量需求的情况下完成的 (对于所有虚拟链路)。然后, 该映射在虚拟网络的整个服务时间内不会改变 (即, 没有重新配置)。另一方面, 通过动态切片, 考虑到其虚拟链路的当前容量需求 (即, 取决于 VN 请求是在白天还是在夜间到达), 使用 MILPmap 或 Heuristicmap 将新的 VN 请求映射到 PN 中。在重新配置过程中, 即当重新配置 PN 中映射的所有虚拟网络以使映射适应虚拟链路容量需求的时间变化时, 使用 MILPreconf 或 Heuristicreconf。

本节的第一部分考虑一个小的 6 节点 PN, 其中动态和静态切片使用 MILP 和启发式方法进行比较。然后, 用一个大的 38 节点 PN 进行相同的比较, 这次使用

只有启发式算法, 因为 MILP 公式

不要针对大型网络场景进行扩展。两种情况下使用的模拟设置如下所述。

A. 模拟设置

针对无线电、云和 IP 租户考虑了三种不同的 VN 请求, 如图 5 所示。表一列出了每个租户对虚拟网络的要求。该表显示了不同租户白天的虚拟链路容量要求。相应的夜间值是通过将白天容量需求乘以夜间交通变化系数获得的。

云租户允许网络提供商使用 PN 中具有足够计算/存储资源的任何 DC。同样, 无线租户的 BBU 酒店可以从 PN 中具有足够 BBU 港口的任何 BBU 酒店中选择。然而, 风险资源单位和工程总承包的位置在虚拟网络请求中有具体说明。IP 租户也是如此, 需要连接的 ISP 节点也在虚拟网络请求中指定。为简单起见, 在本工作中, 在生成虚拟网络请求时, 随机选择无线资源单元、工程总承包和互联网服务提供商节点的具体位置。此外, 假设 PN 中的 DCs 和 BBU 酒店具有足够的计算/存储资源和可用的 BBU 端口, 以保证在节点映射过程中不会拒绝任何 VN。

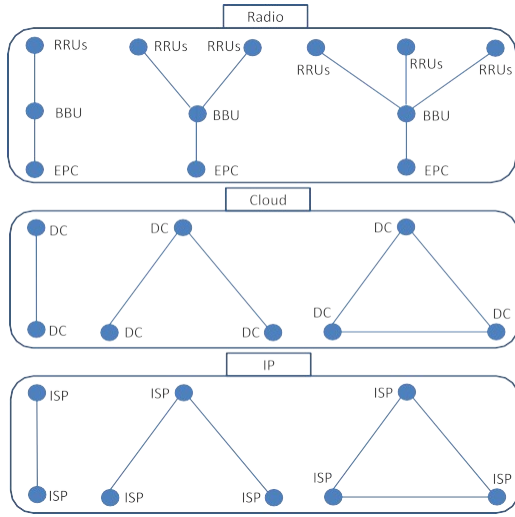


图 5. 为无线电、云和 IP 租户考虑的虚拟网络请求。

表一
无线电、云和知识产权租户的要求

收音机
每个节点的无线资源单元数量 $\sqrt{\text{统一}(5, 15)}$ 前端(无线资源单元-BBU)链路容量(天)= 10 Gbps 回程(BBU-总承包)链路容量(白天)=长途夜间流量变化系数的 10% = $1/8$ [26]
云
DC-DC 链路容量(白天) \propto 统一(50, 100) Gbps 夜间流量变化系数= 25 [27]
互联网协议(Internet Protocol)
ISP-ISP 链路容量(白天) \propto 统一(1200, 1500) Gbps 夜间流量变化系数= $1/8$ [27]

在每个实验中，总共随机生成 1500 个虚拟网络请求，并且在 50 次实验中对结果进行平均。实验使用英特尔至强处理器 E5-1660 运行，该处理器在 3.00 千兆赫的机器上有 8 个内核，内存为 32 GB。白天/夜间持续时间固定为 12 小时，即需要每 12 小时重新配置一次动态切片虚拟网络。虚拟网络请求的到达间隔时间和服务时间呈指数分布。平均服务时间设置为 50 小时，而平均到达间隔时间是可变的，以便产生不同的负载值。MILP 公式是使用 IBM ILOG CPLEX 解决的。MILPreconf 的参数 α 、 β 和 γ 分别设置为 10, 000、1 和 0.0001。对于启发式算法，TP、LP 和 WL 边的权重 WTP、WLP 和 WWL 选择如下 [13]：

$$WTP = 100; WLP = 0.01 \times H; WWL = 0.01;$$

其中 H 代表光路的跳数。

B. 小型 6 节点物理网络

一个小型 6 节点网络 [9] 用于比较动态切片和静态切片的性能，并进行验证

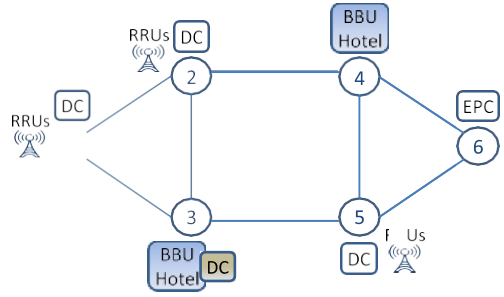


图 6. 小型 6 节点物理网络。

提出的 Heuristicmap 和 Heuristicsreconf 算法的准确性。PN 中的每个光纤链路有 80 个波长，每个波长的容量为 100 Gbps。如图 6 所示，6 节点网络包括两个 BBU 酒店、一个 EPC 和四个连接到 PN 节点的 DCs。

图 7(a) 显示了使用静态和动态切片时不同负载值的平均 VN 拒绝概率。可以看出，当网络处于中高负载条件时 (即拒绝概率 < 0.1)，动态切片将 VN 拒绝概率降低了大约 5 倍。此外，MILP 公式和启发式算法的结果非常接近。这表明提出的启发式算法设计得很好，并给出接近最优的结果。有趣的是，在非常高的负载值下，动态切片的启发式算法在总体 VN 拒绝概率方面的表现似乎比 MILP 公式稍好。这是因为虚拟网络请求具有不同的容量要求 (表一)。如果 (在高负载条件下) MILPmap 成功映射了一个要求非常高的虚拟网络请求 (即在容量需求方面)，这可能会导致在相当长的一段时间内无法容纳任何其他虚拟网络请求。另一方面，Heuristicmap 可能无法成功映射同样要求很高的 VN 请求。因此，可以在 PN 中映射一些额外的 (对容量要求较低的) 虚拟网络请求。

动态切片在虚拟网络拒绝概率方面的提高是以虚拟网络降级为代价的。图 7(b) 给出了方程 D 的值。(1)] 对所有接受的虚拟网络请求取平均值。该值在低负载时非常小，在高负载时趋于增加。尽管如此，可以注意到，在 VN 抑制方面的最大增益来自相对较低的降级值，即在使用 MILP 的 12.5 Erlangs 时最多 0.4%。然而，由于启发式算法的次优性能，虚拟网络的退化随着启发式算法而增加。

图 7(c) 显示了 PN 的八个光纤链路中平均使用了多少个波长。正如预期的那样，通过尽可能将虚拟网络映射与实际容量需求紧密匹配，所提出的动态切片方法能够减少堵塞光纤链路的数量。

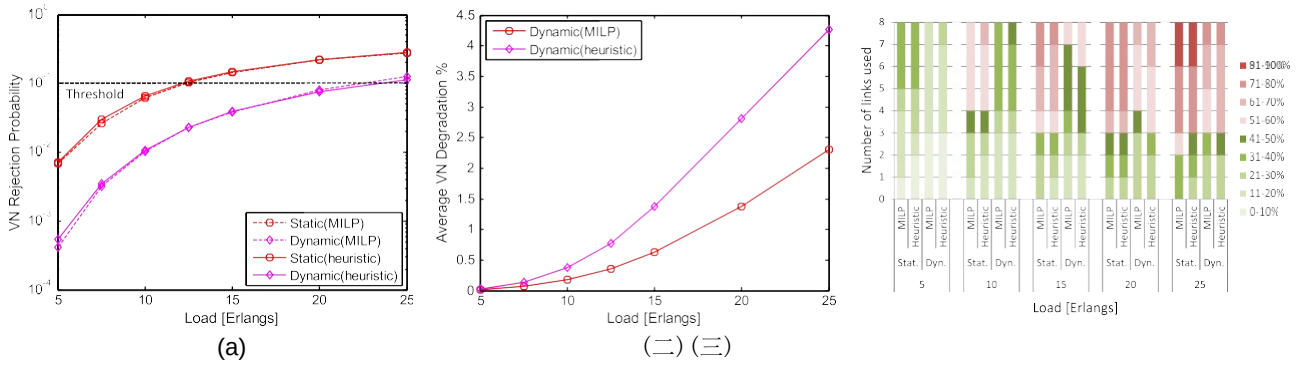


图7. 使用6节点物理网络的结果。(a)静态和动态切片的VN拒绝概率, (b)动态切片的平均VN降级, 以及(c)不同负载值的平均链路使用率。

使用具有上一小节中描述的规格的机器, 当考虑具有1500个VN请求的实验时, 发现使用MILP公式的执行时间的平均值(即, 在所有负载值上并且考虑每个负载的50次实验)大约为50分钟。然而, 启发式算法的平均执行时间约为30秒。这清楚地表明了启发式算法如何更有可能在大规模网络中扩展。注意, 上述时间包括多次解决映射和重新配置问题, 即在1500个VN请求中, MILPmap/Heuristicmap在每次到达时被求解, 并且在实验中, 即在切换时, 每12小时调用一次mil precopf/heuristicreconf白天和黑夜之间。

C. 大型38节点物理网络

上一小节显示, 动态切片的启发式算法非常接近最优值。然后可以安全地使用它们来评估大型网络场景中动态切片的好处。考虑中的网络如图8所示。它由38个节点和60条链路组成[28]。每条光纤链路有80个波长, 每个波长的容量为100 Gbps。两个BBU酒店, 一个工程总承包, 五个集散控制系统如图所示。未连接到BBU酒店或EPC的每个节点都连接到多个rru(为了清楚起见, 图8中未示出)

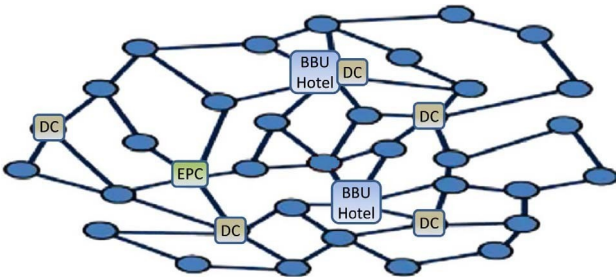


图8. 大型38节点物理网络。

在表一中提供。在这组新的实验中使用的VN请求的集合是图5中呈现的集合。

图9(a)显示了动态和静态切片的平均VN拒绝概率。当PN处于中到高负载条件时, 动态切片呈现比静态切片好1个数量级以上的VN拒绝概率值(即拒绝概率 <0.1)。图9(b)和9(c)分别显示了静态和动态切片的VN拒绝概率的每VN类型分解。这些数字证实, 无论租户类型如何, 动态切片都会提高虚拟网络拒绝概率值。对于动态切片的情况, 云租户具有最高的拒绝概率, 这是因为其高容量需求和Heuristicreconf固有的低效率。但是, 对于静态切片的情况, 云租户的拒绝概率比IP租户低。这是因为ISP节点的位置是在来自IP租户的VN请求中预先定义的。相比之下, 对于云租户来说, 由网络提供商来选择DC节点的位置, 而Heuristicmap算法总是选择最佳节点, 从而实现最小的PN资源使用。

图9(d)显示了不同负载值下的平均电压降。可以观察到, 对于对应于在VN重新调整概率方面的最高益处的负载值, 降级值非常小, 即在35 Erlangs时达到0.7%。此外, 图9(e)显示了平均VN降解的每VN型分解。从图中可以看出, 云租户的降级程度最高。这是可以预期的, 因为云租户是容量需求最高的租户。

图9(f)给出了PN的60个光纤链路中平均波长使用的值。在这种情况下, 由于网络的大尺寸, 波长的使用更加分散, 即网络边缘的一些链路可能没有使用到它们的最大容量。另一方面, 网络中心的链路是利用率最高的链路。然而, 平均而言, 可以看出, 与静态切片相比, 动态切片有助于降低光纤链路阻塞的值, 这反过来有助于将更多虚拟网络接纳到PN中。

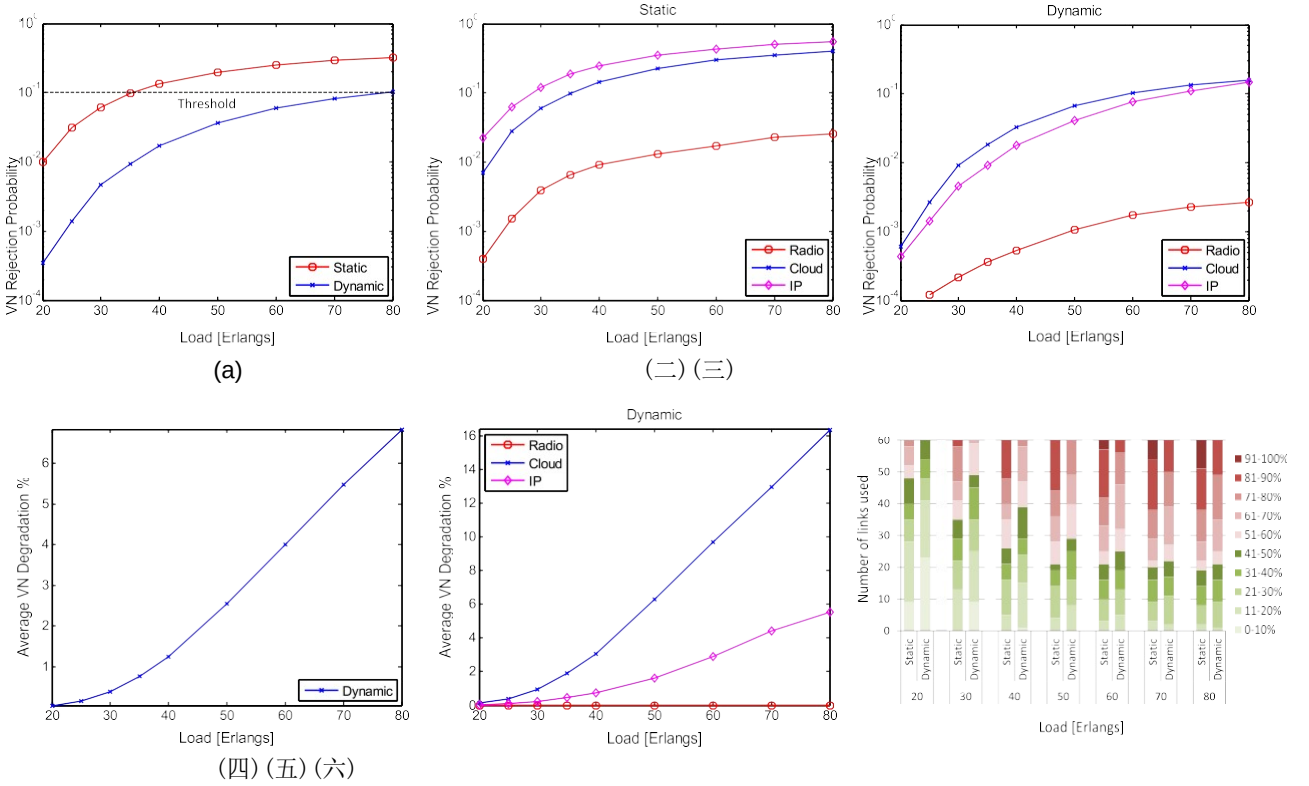


图9. 使用38节点物理网络的结果。(a)虚拟网络拒绝概率和(b)、(c)静态和动态切片的虚拟网络拒绝概率的每虚拟网络类型细分；(d)平均虚拟网络降级和(e)动态切片的平均虚拟网络降级的每虚拟网络类型细分；(f)不同负载值的平均链路使用率。

VIII. 结论

本文评估了动态切片的好处，其中根据不同租户容量需求的时间变化来重新配置对应于不同租户的虚拟网络。动态切片的性能以静态方法为基准，在静态方法中，在整个虚拟网络服务时间内为每个切片分配固定数量的资源(即，对应于峰值容量要求)。

与现有的工作不同，我们的方法利用高级编排功能在不同租户之间智能地分配和重新分配资源。在5G传输网络中，由于需要联合供应来自不同技术领域(例如，无线电、传输和云)的资源，编排者可以通过利用具有(可能)完全不同服务需求的不同类型租户的存在来实现更好的资源效率，这一事实激发了对动态切片的需求。

基于MILP公式和启发式算法的结果表明，重新调整和重新映射资源切片(即，尽可能地匹配每个虚拟网络的需求)可以更有效地利用虚拟网络资源。事实上，在所考虑的场景中，它已经

据观察，动态切片可以提高虚拟网络

拒绝概率超过1个数量级。这一改进可以帮助网络提供商增加收入。另一方面，使用动态切片可能会导致某些服务降级。然而，该论文表明服务降级非常小，并且对于网络提供商和租户来说都在可接受的水平之内。

在未来的工作中，我们计划研究一个更一般的动态切片问题，即考虑虚拟节点和链路资源需求的变化。在这种情况下，网络提供商可能必须将虚拟节点重新映射到PN中的某个其他位置，以匹配存储和处理方面的更新需求。此外，从动态切片思想的概念证明演示中获得一些实验结果将是非常有趣的，这将留给未来的工作。

附录一

本节描述了用于线性化MILPreconf公式中的一些约束的过程。

通过使用以下约束将约束(21)线性化：

$$z_{ij} \leq \sum_{p \in P} p_{ij}^M ; \forall i \in I; j \in N: I \neq j; \forall m \in n; n \in Nb; \\ \text{锰锰硫} \quad s \quad m$$

(A1)

$$\frac{zq_{ij}}{1j} \geq M(1 - p_{ij}) \quad \forall i \in N; j \in N: i \neq j; \forall m \in n; n \in Nb; \quad (A2)$$

其中 M 是一个非常非常大的数字。

另一方面，约束(22)通过使用以下约束集被线性化：

$$zq_{ij} \leq M p_{ij}; \quad \forall i \in N; j \in N: i \neq j; \forall m \in n; n \in Nb; \quad (A3)$$

$$zq_{ij} \geq M p_{mn} \quad \forall i \in N; j \in N: i \neq j; \forall m \in ns; n \in Nbm; \quad (A4)$$

$$zq_{ij} \leq zq_{ij} + M(1 - p_{mn}); \quad \forall i \in N; j \in N: i \neq j; \forall m \in ns; n \in Nbm; \quad (A5)$$

$$zq_{ij} \geq zq_{ij} - M(1 - p_{ij}); \quad \forall i \in N; j \in N: i \neq j; \forall m \in ns; n \in Nbm; \quad (A6)$$

$$u_{ij} = \sum_{j \in Nbm} zq_{ij}; \quad \forall i \in N; j \in N: i \neq j; \quad (A7)$$

其中 zq_{ij} 表示 zq_{ij} 和 p_{ij} 的乘积，而 M 是一个非常非常大的数字。

承认

本文描述的工作是在由 VINNOVA 和 Ericsson 资助的 Kista 5G 传输实验室 (K5) 项目和 H2020-ICT-2014 项目 5GEx (第 671636 号赠款协议) 的支持下进行的。

参考

- [1] 页 (page 的缩写) 奥伦、斯库比奇、罗斯塔米、费奥拉尼、蒙蒂、盖布雷坦萨、莫滕森、王凯和沃辛斯卡，“用于 5G 传输网的数据平面和控制架构—作品”，《光波技术》，第 34 卷，第 6 期，第 1501-1508 页，2016 年 3 月。
- [2] A. 罗斯塔米，p. hlen, K. Wang, Z. Ghebretensaé, B. Skubic, M. Santos 和 A. Vidal，“为 5G 协调 RAN 和传输网络资源：一种 SDN 方法”，IEEE 社区。玛格，第 55 卷，第 4 期，第 64-70 页，2016 年。
- [3] A. 马约拉尔，r. 穆尼奥斯，r. 维拉塔，r. 卡塞拉斯，r. 马丁内兹和 v. 洛佩兹，“通过虚拟化基础设施管理器和规划器对用于云和网络全球协调的 5G 中的传输 API 的需求”，J. Opt. 社区。Netw.，第 9 卷，第 1 期，第 A55-A62 页，2017 年 1 月。
- [4] 米 (meter 的缩写) Raza, M. Fiorani, A. Rostami, P. Ohlen, L. Wosinska 和 P. Monti，“5G 传输网络中可编程性的好处”，载于《光纤通信会议》。(OFC)，2017 年，论文 M2G. 3
- [5] A. Rostami, A. Vidal, M. A. Santos, M. R. Raza, F. Moradi, B. Pechenot, Z. Ghebretensaé, P. Monti 和 P. Ohlen，“用于 5G 网络中动态服务创建的端到端可编程平台”，载于《光纤通信会议》。(OFC)，2017 年，文件 Tu3L. 14

- [6] 米 (meter 的缩写) 余，易永义，雷克斯福德，蒋美明，“重新思考虚拟网络嵌入：对路径分裂和迁移的衬底支持”，Comput. 社区。修订版，第 38 卷，第 2 期，第 17-29 页，2008 年 3 月。
- [7] 名词 (noun 的缩写) 乔杜里，拉赫曼和布塔巴，“具有协调的节点和链路映射的虚拟网络嵌入”，在 IEEE INFOCOM，2009 年 4 月。
- [8] A. Blenk 和 W. Kellerer，“基于流量模式的虚拟网络嵌入”，CoNEXT 学生研讨会，ACM，2013，第 23-26 页。
- [9] 南张，网络虚拟化与灵活网格光网络选择。切换 Netw.，第 10 卷，第 4 期，第 291-300 页，2013 年 11 月。
- [10] A. 虚拟光网络分配策略。列特，第 16 卷，第 2 期，第 268-271 页，2012 年 2 月。
- [11] 开放网络基金会 (ONF)，“将 SDN 架构应用于 5G 切片”，技术报告 TR-526，第 1 期，2016 年 4 月 [在线]。可查阅：https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/SDN-resources/technical-reports/application_SDN_Architecture_to_5G_Slicing_TR-526.pdf
- [12] 长度龚，赵文伟，温永明，朱志军，“动态透明弹性光学基础设施上的虚拟网络嵌入。糖膏剂来文委员会，2013 年 6 月。
- [13] J. 张永吉，宋敏明，李海红，顾若兰，赵永年，张军，“多层光纤上的动态虚拟网络嵌入网络”，J. Opt. 社区。Netw.，第 7 卷，第 9 期，第 918-927 页，2015 年 9 月。
- [14] A. Mayoral, R. Vilalta, R. Casellas, R. Martinez 和 r. 穆尼奥斯，“具有虚拟化租户管理和编排 (MANO) 实例动态部署的多租户 5G 网络切片架构”，载于 European Conf. 关于光通信 (ECOC)，2016 年 9 月。
- [15] R. 维拉塔、穆尼奥斯、卡塞利亚斯、马丁内斯、彭、米 (meter 的缩写) Channegowda, T. Vlachogiannis, R. Nejabati, D. Simeonidou, X. Cao, T. Tsuritani 和 I. Morita，“动态多域虚拟光网络部署异构控制域 [邀请]”，J. Opt. 社区。Netw.，第 7 卷，第 1 期，第 A135-A141 页，2015 年。
- [16] 南弹性光网络中的虚拟网络嵌入和重构。(GLOBECOM)，2014 年 12 月。
- [17] F. 顾，彭明敏，汗，雷，加尼，“光基底网络中的虚拟网络重构”，载于《光纤通信会议》。(OFC)，2013 年，第 n4j. 6 号论文
- [18] 米 (meter 的缩写) A. Siqueira, F. N. Hooft, J. R. Oliveira, E. R. Madeira, 和 C. 罗森博格，“利用基于策略的传输 SDN 提供光网络即服务”，J. Netw. 系统。管理，第 23 卷，第 2 期，第 360-373 页，2015 年 4 月。
- [19] A. 阿森西奥、鲁伊斯、孔特雷拉斯和维拉斯科，“支持 C-RAN 回溯的动态虚拟网络连接服务”，J. Opt. 社区。Netw.，第 8 卷，第 12 期，第 B93-B103 页，2016 年 12 月。
- [20] A. 阿瓜多、戴维斯、彭、阿尔瓦雷斯、洛佩斯、T. Szyrkowiec, A. Autenrieth, R. Vilalta, A. Mayoral, R. 穆尼奥斯、卡塞拉斯、马丁内斯、吉凯恩、特里塔尼、内贾巴蒂和西蒙杜，“通过 SDN 协调的多技术动态虚拟网络重构”光学传输领域，第 34 卷，第 8 期，第 1933-1938 页，2016 年 4 月。

- [21] “面向 5G 的动态端到端网络切片”，《诺基亚白皮书》，2016 年 [在线]。可用：<http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200339>。
- [22] F. WDM 核心网络架构的功率消耗分析。社区。Netw.，第 4 卷，第 2 期，第 108–117 页，2012。
- [23] J. 胡和，“光网状网络中的流量疏导、路由和波长分配”，载于 IEEE INFOCOM，2004 年 3 月。
- [24] “C-RAN——迈向绿色 RAN 之路”，中国移动白皮书，3.0 版，2013 年 12 月【在线】。可用：http://labs.中国移动通信网/cran/WP-content/uploads/2014/06/2014_06_13-C-RAN-WP-3.0.pdf。
- [25] 长度不伦瑞克、埃尔戈拉希和埃尔米尔加尼，“面向云的高能效虚拟网络嵌入网络”，j. 光波技术。，第 33 卷，第 9 期，第 1828–1849 页，2015 年 5 月。
- [26] G. 奥尔、奥·布卢姆、贾尼尼、戈多、伊姆兰、Y. Jading, E. Katranaras, M. Olsson, D. Sabella, P. Skillermark 和 W. Wajda, “参考系统的能效分析，改进领域和目标细分”，地球项目报告 INFSO-ICT-247733，交付品 D2.3，2012 年。
- [27] F. “基于大数据分析的流量预测虚拟网络拓扑重构”，载于《光纤通信会议》。(OFC)，2016 年，论文 Th3I.5
- [28] 南以密集波分复用为中心的融合城域网/汇聚网的光纤路由、波长分配和复用。关于光通信 (ECOC)，2013 年 9 月。