

## 基于软件定义网络的分层路径规划策略

何杰挺, 王子磊, 奚宏生

(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027)

**摘 要:** 基于软件定义网络的流媒体边缘云需要有效的路径规划策略, 传统规划策略多数仅考虑网络负载和拓扑信息, 在执行效率和优化效果上存在不足。为此, 提出一种动态分层的规划策略。利用不同用户区域服务请求的相对独立性, 通过对物理网络资源的虚拟划分将原问题分治为多个子问题, 并在求解过程中综合考虑服务现状和视频流行度信息以对网络资源进行分配。实验结果表明, 该策略能有效避免网络拥塞, 提升系统服务质量, 并保持较低的服务代价。

**关键词:** 软件定义网络; 流媒体边缘云; 路径规划; 队列调度; 动态资源分配; 流量工程

**中文引用格式:** 何杰挺, 王子磊, 奚宏生. 基于软件定义网络的分层路径规划策略[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 268-273, 279.

**英文引用格式:** HE Jieting, WANG Zilei, XI Hongsheng. Hierarchical Path Planning Strategy Based on Software Defined Networking[J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 268-273, 279.

## Hierarchical Path Planning Strategy Based on Software Defined Networking

HE Jieting, WANG Zilei, XI Hongsheng

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**[Abstract]** The Streaming Media Edge Cloud(SMEC) based on Software Defined Networking(SDN) needs effective path planning strategy. However, the traditional path planning strategy in SDN only considers the load of network and topology information, there are some defects both in the execution efficiency and optimization effect. To solve the problem, a dynamic hierarchical path planning strategy is proposed. It uses the relative independence of different user regional service requests, and divides the original problem into multiple sub problems by the virtual division of physical network resources, and considers the service status and video popularity information in the process of solving, so as to allocate the network resources. Experimental results show that the proposed strategy can effectively avoid network congestion, improve the service quality of the systems and maintain a low service cost.

**[Key words]** Software Defined Networking (SDN); Streaming Media Edge Cloud (SMEC); path planning; queue scheduling; dynamic resource allocation; Traffic Engineering (TE)

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0046615

### 0 概述

随着云计算技术的日趋成熟, 流媒体业务也由传统的内容分发网络(Content Distribution Network, CDN)、对等网络(Peer-to-peer Network, P2P)等模式向流媒体云模式转变。流媒体云不仅具有云计算高度动态、灵活易扩展的特性, 还主动将原位于网络核心的服务内容外推至网络边缘, 显著减少了用户服务请求时延和骨干网络流量负载。目前, 已有多种形式的流媒体云平台被提出并投入使用<sup>[1-2]</sup>。

作为一种资源密集型的服务模式, 如何对其系统内部的存储、计算、网络等资源进行合理分配, 以

提升系统整体服务能力, 是流媒体云资源调度的重点。而沿用 TCP/IP 协议族的传统流量工程(Traffic Engineering, TE)因缺乏必要的管控能力, 导致不能在有限资源下向用户提供更好服务<sup>[3]</sup>。软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)能够较好地解决该问题, 因此, 其一经提出便得到了业界的广泛关注。控制平面与转发平面相分离的设计模式, 为网络流量的行为控制带来了众多机遇和优势<sup>[4]</sup>。

在有限网络资源下, 用户请求模式的变动会导致资源使用率的失衡和系统整体服务能力的下降。如何对 SDN 中的资源进行合理优化, 以提升系统的整体服务能力, 业界对此进行了大量的研究。文献[5]提出一

**基金项目:** 国家自然科学基金(61233003); 中央高校科研业务费专项资金; 中国科学院青年创新促进会项目。

**作者简介:** 何杰挺(1991—), 男, 硕士研究生, 主研方向为网络多媒体、未来网络; 王子磊, 副教授; 奚宏生, 教授。

**收稿日期:** 2017-03-31      **修回日期:** 2017-05-18      **E-mail:** zlwang@ustc.edu.cn

种保障视频流端到端服务质量的动态资源分配框架,并使用带约束的最短路径(Constrained Shortest Path, CSP)模型为业务流提供最佳路径。文献[6]针对可伸缩视频编码(Scalable Video Coding, SVC)提出一种自适应路由策略,通过对不同层次视频流路径进行优化,达到系统整体最优。但是,上述路径规划策略都没有充分利用用户请求产生的应用层信息,仅采用网络拓扑结构和链路使用率对业务流进行路径优化,容易在最短路径上产生拥塞和丢包。因此,利用单一网络信息对业务流进行优化的策略,不仅没有很好的优化效果,而且不易于系统的动态扩展。

为了提升系统的优化效果,本文提出一种适用于 SDN 的动态路径优化策略,使用用户请求的区域信息,将优化问题分治为多个区域内的子问题,通过对物理网络资源的虚拟化处理为各个用户区域提供独立的逻辑网络资源。当区域使用量产生波动时,对分配结果进行动态柔性调整,尽可能多地满足各个区域的用户需求。在子优化问题的求解中,充分利用当前流行度信息,当视频流行度发生变化时,综合考虑网络资源使用率和服务现状,并对分配结果进行动态调整。此外,在将数据流的具体转发规则通过 SDN 中心控制器下发给各交换机时,如校园网络<sup>[7]</sup>、企业网络<sup>[8]</sup>和数据中心网络<sup>[9-10]</sup>的控制方式会产生众多的流表项,为缓解流表项和交换机存储空间间的矛盾,本文提出一种结合队列调度的执行机制:业务流数据包在包头携带特定标签,交换机根据标签上的路径信息选路,根据权重信息设定转发速率。

## 1 边缘云服务模型

本文处理的一种流媒体边缘云(Streaming Media Edge Cloud, SMEC)服务系统模型如图 1 所示。SMEC 部署在网络边缘,通过基于 SDN 技术的承载网络向周边地区提供视频服务。由支持 OpenFlow 协议的控制器和交换机组成视频流承载网络的主体。

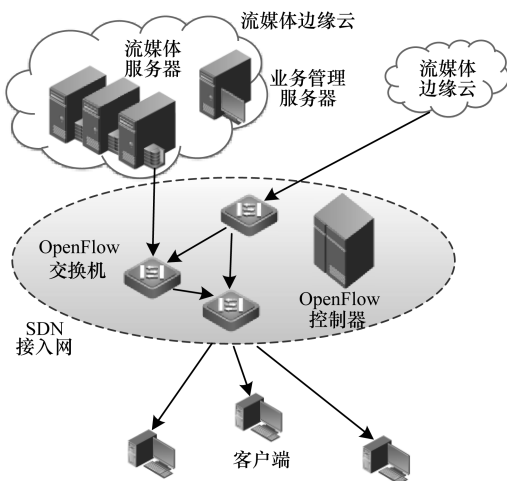


图 1 基于 SDN 的 SMEC 服务架构

SMEC 内部由多个流媒体服务器和业务管理服务器组成。其中,流媒体服务器上部署了相应的视频资源;业务管理服务器用于处理用户的服务请求,并将服务信息提供给 OpenFlow 控制器。众多的客户端从网络边缘接入,从相同交换机接入的客户端被抽象成一个用户区域。

针对接入 SMEC 系统的众多视频请求,需要在网络中分配合适的承载路径,系统中的整体请求可以看作各个用户区域请求的叠加。不同区域间的服务请求除了共享系统网络资源外,还具有一定的独立性。通过网络资源虚拟化的手段将物理网络按照用户区域划分成多个独立子网络,可将原路径优化问题分治为多个用户区域内的子问题。为了更好地分治优化问题并动态适应各个分治区域请求的波动性,本文提出如图 2 所示的分层优化方案:资源虚拟化为分治问题,产生网络切片,运用路径规划求解各个分治子问题。

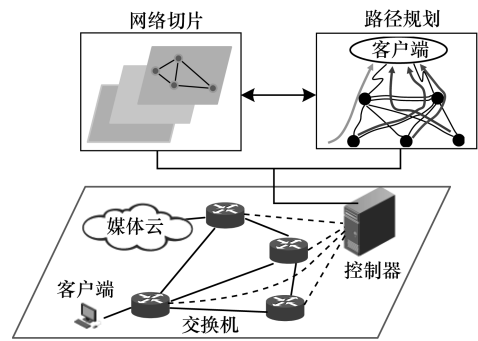


图 2 OpenFlow 控制器分层策略示意图

假设由 OpenFlow 交换机构成的网络拓扑为  $G = (N, E)$ , 其中,  $N$  为网络中的交换机节点集合,  $E$  为网络中的有向链路集合。记网络  $G$  中客户端的接入节点集合为  $N_c \subset N$ , 且  $|N_c| = K$ 。SMEC 的接入节点集合为  $N_s \subset N$ , 且  $|N_s| = T$ 。SMEC 提供的视频内容记为  $\{v_i\}_{i=1}^I$ 。结合目前流媒体研究中普遍采用的多码率自适应技术<sup>[11]</sup>, 视频内容  $v_i$  的码率记为  $b_i \in [b_i^{low}, b_i^{high}]$  (假设不同视频的最低码率  $b_i^{low}$  相等)。本文对用户区域内服务请求整体进行路径规划。视频业务因其较长的服务时间, 当区域内业务流达到动态平衡时, 单个用户请求的突发性会被削弱, 此时更多地表现为视频流行度之类的规律性。不同视频内容的流行度记为  $p_i, i = 1, 2, \dots, I$ , 其可以根据 SMEC 中业务服务器记录的请求信息采用合适的预测算法<sup>[12]</sup>而准确获得。

在上述模型下, 本文的研究问题可以描述为: 在网络拓扑  $G$  已知的情况下, 利用不同视频的流行度信息, 结合当前网络的运行状态, 通过动态调整网络中视频流的承载链路和带宽, 使得网络资源能够承载更多的视频流。

## 2 分层路径规划方案

### 2.1 方案描述

本文整体优化方案分为资源虚拟化和路径规划两方面。首先,根据客户端长期请求产生的需求信息将完整的物理网络进行虚拟化:按用户接入节点将物理网络划分成  $K$  个独立子网  $G_k, k=1, 2, \dots, K$ , 并将原始物理网络的众多链路约束转换为常数条的路径约束,考虑到网络使用量的波动性,当分配的虚拟化阈值不能满足子网需求时,执行动态调整过程,用最小的代价满足各子网的需求。然后,在任意逻辑子网  $G_k$  中,使用不同视频内容的流行度  $p_i^k$  对业务流的路径选择和带宽分配进行指导。流行度的变化会触发路径规划的动态调整,而资源虚拟化过程是路径规划的输入,因此,虚拟化动态调整也可能触发路径规划的动态调整。

考虑到 OpenFlow 交换机中有限的流表空间,本文提出一种基于队列调度的带宽分配方案,该方案能有效减少流表空间的占用,适用于拓扑复杂、业务繁重的 SMEC 等系统。

### 2.2 资源虚拟化策略

对完整的物理网络进行虚拟化分割,为上层路径规划提供数据源到目的地的连通性保证,并根据各子网的实际网络使用情况重新调整分割方案,使网络尽可能多地承载业务数据流。

为使对各子网的资源分配达到网络层面的公平,本文采用将网络中最小割链路扩展为完整路径的方法,为每个独立的子网  $G_k$  选取  $J$  (常数) 条从 SMEC 到用户区域的完整路径,并对物理网络按上述路径进行带宽资源预分配,分配阈值矩阵记为  $\mathbf{M} = (m_{kj})_{K \times J}$ , 其中,元素  $m_{kj}$  表示子网  $G_k$  中第  $j$  条路径分配的阈值带宽。当新的视频服务需求到达时,如果子网内的整体使用流量  $u_k$  没有超过预分配值,则直接提供服务。考虑到网络流量的波动性,当预分配值不能满足服务流量需求时,需要对分配矩阵  $\mathbf{M}$  进行调整。

考虑到在 SDN 中,控制器需要通过下发流表的方式将决策信息告之相关的交换机,且虚拟子网的阈值改变也会触发路径规划策略的执行,因此,在对矩阵  $\mathbf{M}$  进行动态调整时,尽量使每次调整涉及的路径较少,故给出如下优化目标:

$$\min_{m_k^*} \left\{ \sum_{k=1}^K \| \mathbf{m}_k^* - \mathbf{m}_k \|_0 \right\} \quad (1)$$

其中,行向量  $\mathbf{m}_k^*$  表示子网内各路径调整后的带宽分配值。调整前行向量差的  $l_0$ -范数之和表示需要重新下发流表调整流量限制的数量。最小化该优化目标即达到每次调整代价最小的目的。

为保证每次作出的调整能够满足下一时刻的流量需求  $u_k$ ,引入第 1 条子网流量约束,使得为每个子网分配的流量之和均大于需求。其次,为了使分配在不同路径上的流量之和不超过每一条承载链路的物理带宽,引入第 2 条链路物理带宽约束。用矩阵  $\mathbf{Y}_k$  表示路径与链路间的关系,矩阵  $\mathbf{Y}_k$  维数为  $J \times L, L$  是物理网络中的链路数量;用元素  $y_{jl}^k$  表示第  $j$  条路径是否使用了链路  $l$ ,该变量值为 0 或 1;用行向量  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^L$  表示链路的物理带宽。

综上,以带宽分配矩阵  $\mathbf{m}^*$  为决策变量,给出如下动态调整模型:

$$\text{Obj: } \min \left\{ \sum_{k=1}^K \| \mathbf{m}_k^* - \mathbf{m}_k \|_0 \right\}$$

Subject to:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J m_{kj}^* &\geq u_k, k=1, 2, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K (\mathbf{m}_k^* \mathbf{Y}) &\leq \mathbf{c} \end{aligned}$$

在该优化模型中,包含一个  $l_0$ -范数的优化目标,然而  $l_0$ -范数的非凸性使得优化模型无法通过凸优化的方式进行求解。在实际中,可用  $l_0$ -范数的最优凸近似  $l_1$ -范数替换  $l_0$ -范数<sup>[13]</sup>,再通过凸优化进行求解。

### 2.3 路径规划策略

对资源进行虚拟化后,原始的总体路径规划转换为在每一个子网  $G_k$  中的路径规划。此时,在每个子网中需要解决的问题是:对于任一需要传递的业务数据流,选择使用哪些路径并在响应路径上使用多少的带宽。为了解决该问题,首先利用不同视频内容的流行度信息  $p_i^k$  对各路径上的带宽资源进行静态分配,分配矩阵记为  $\mathbf{F}^k = (f_{ij}^k)_{I \times J}$ , 当具体需要传递的数据流到达时,如果带宽使用不超过分配的阈值,则直接选择当前使用率最低的路径进行传送;否则,说明用户区域的流行度发生了变化,静态分配方案不能满足变化后的需求,需要进行动态调整并重新确定分配矩阵  $\mathbf{F}^k$ 。

#### 2.3.1 静态初始化过程

为使每个子网中的资源得到充分利用,静态分配时需要为各视频内容分配尽可能多的带宽。考虑到底层提供的连通性并不能保证每个视频内容在所有路径对应的 SMEC 上都有部署,因此,给出部署矩阵  $\mathbf{D}^k = (d_{ij}^k)_{I \times J}$ , 元素  $d_{ij}^k$  表示视频内容  $v_i$  是否在子网  $k$  中的第  $j$  条路径上部署,其值为 0 或 1。则针对视频内容的有效带宽分配,可以由分配矩阵向量和部署矩阵行向量的转置相乘给出,即  $\mathbf{f}_i^k \mathbf{d}_i^{kT}$ 。静态分配的优化目标如下:

$$\max_{f_i^k} \left\{ \sum_{i=1}^I (f_i^k d_i^{kT}) \right\} \quad (2)$$

该目标即为在各视频分配的有效带宽之和最大。

理想条件下,子网内各视频分配的带宽应该等于流行度要求的带宽,即  $f_i^k \cdot d_i^{kT} = (\sum_j m_{kj}) \cdot p_i^k$ 。在实际情况下,由于网络整体的服务能力等的限制,允许分配的带宽通常小于流行度需求,为此,引入第 1 条流行度约束;在各路径上,为不同视频内容分配的带宽之和不能大于该路径的总带宽,因此,引入第 2 条路径带宽约束。完整的静态分配模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Obj: } & \max_{f_i^k} \left\{ \sum_{i=1}^I (f_i^k d_i^{kT}) \right\} \\ \text{subject to:} & \\ & f_i^k \cdot d_i^{kT} \leq \alpha p_i^k, i = 1, 2, \dots, I \\ & \sum_{i=1}^I f_{ij}^k \leq m_{kj}, j = 1, 2, \dots, J \end{aligned}$$

该模型是一个凸优化模型,可以通过凸优化的方式进行求解。

### 2.3.2 动态调整过程

在实际服务过程中,不可避免地存在视频流行度发生变化的情况,这时需要对分配矩阵  $F^k$  进行重新调整。在保证有效分配带宽尽可能大的同时,对视频带宽在不同路径上的分配作出指导,使得路径的负载趋于均衡,引入次优化目标:

$$\min_{f_{ij}^{kr}} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \max[(f_{ij}^{kr} - f_{ij}^{k*}) \cdot d_{ij}^k, 0] \right\} \quad (3)$$

其中,由  $f_{ij}^{kr}$  组成的矩阵  $F^{kr}$  是一个常量参照矩阵,由当前时刻各路径的带宽使用情况  $\mu_j^k$  得到:对于触发动态调整的请求  $r^k$ ,假设其请求的视频内容为  $v_r^k$ ,当前子网中的第  $j'$  条路径的使用率最低,则对应元素  $f_{rj'}^{kr} = \mu_{rj'}^k + b^{\text{low}}$ ;矩阵中的其余元素为  $f_{ij}^{kr} = \mu_{ij}^k, \forall i \neq r \text{ 或 } \forall j \neq j'$ 。理论上,路径负载越小,其被分配的带宽越大。但是考虑到 SMEC 开始服务后便启动了上述动态调整方案,可以认为各路径的负载基本趋于平衡,上述优化目标能够达到理想效果。

在约束方面,除流行度约束和路径带宽约束外,还需要引入第 3 条约束:保证分配的带宽能够满足当前流量的正常使用,即  $\sum_j f_{ij}^{k*} \geq \sum_j \mu_{ij}^k$ 。完整的动态调整模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Obj 1: } & \max_{f_i^{k*}} \left\{ \sum_{i=1}^I (f_i^{k*} d_i^{kT}) \right\} \\ \text{Obj 2: } & \min_{f_{ij}^{k*}} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \max[(f_{ij}^{kr} - f_{ij}^{k*}) \cdot d_{ij}^k, 0] \right\} \\ \text{subject to:} & \end{aligned}$$

$$f_i^{k*} \cdot d_i^{kT} \leq \alpha p_i^k, i = 1, 2, \dots, I$$

$$\sum_{i=1}^I f_{ij}^{k*} \leq m_{kj}, j = 1, 2, \dots, J$$

$$\sum_{j=1}^J f_{ij}^{k*} \geq \sum_{j=1}^J \mu_{ij}^k, i = 1, 2, \dots, I$$

该模型是一个多目标凸优化模型,可使用分层序列法对其进行求解,首先针对第 1 个优化目标进行凸优化求解,得到最优值后将第 1 个优化目标转换为新增最优值约束,再对第 2 个优化目标进行凸优化求解。

### 2.4 执行策略

在 CDN 中,交换机的转发策略需要中心控制器统一下发。在交换机一侧,用于存储流表项的三态内容寻址存储器 (Ternary Content Addressable Memory, TCAM) 因其高昂的造价而无法大规模应用<sup>[14]</sup>。随着网络拓扑和应用业务规模的增加,中心控制器的性能和交换机的流表内存容易成为 CDN 发展的瓶颈。

为了减少中心控制器的工作,资源虚拟化后的路径规划可以交由每个子网内的独立控制器执行。子控制器的优化结果为每一个视频内容  $v_i$  提供可行路径和带宽上限。如果对子网内每个视频流进行下发流表控制,流表总量将与业务流数量成正比。为减少流表数量,当业务流  $v_r$  通过入口交换机时,在其包头内打上一个标签,标签内容包括承载路径编号  $j_r$  和相对权重  $\omega_r$ 。路径的选取原则上是在可行路径中选取负载最小的路径,即  $j_r = \underset{j \in \{j | f_{ij} \cdot d_{ij} > 0\}}{\text{argmin}} \{ \mu_j \}$ 。权重设置为最小比特率与路径上该视频分配带宽的比值,即  $\omega_r = b^{\text{low}} / f_{rj_r}$ 。网络中的其他节点根据包头部标签中的路径编号选择正确的转发端口;在转发端口上,根据标签内部的权重信息,采用基于加权平均队列 (Weighted Fair Queuing, WFQ)<sup>[15]</sup> 的调度方式按相对权重转发数据包。

在普通交换机上,仅需维护常数条路径所需的流表项;在边缘云入口交换机上,维护与部署视频种类相关的信息,上述均与系统具体视频流无关。该措施有效地突破了 CDN 中常见的性能瓶颈,能够在大规模 SMEC 承载网络上使用。进一步考虑到多码率自适应流媒体技术,使用最小比特率进行带宽分配,保证在路径负载率较高时视频能正常播放。但当路径不满载时,即存在  $\sum_{r_s} \omega_{r_s} = (S \cdot b^{\text{low}}) / f_{rj_r} < 1$ , 此时视频流  $r_s$  分配到的实际带宽为  $b^{\text{real}} \triangleq [\omega_{r_s} \cdot f_{rj_r} / (\sum_{r_s} \omega_{r_s})]$ , 显然有  $b^{\text{real}} > \omega_{r_s} \cdot f_{rj_r} = b^{\text{low}}$ , 即能获得比最低比特率更好的视频服务。

### 3 性能仿真与分析

#### 3.1 仿真实验设置

仿真所用网络拓扑由波士顿大学的拓扑生成器 BRITE<sup>[16]</sup>生成,各用户区域使用的流量数据基于中国科学技术大学校园网络多个互联网服务供应商(Internet Server Provider, ISP)出口处的真实网络使用量产生:每 5 min 测量一次校园网 5 个独立 ISP 网络出口的带宽使用情况,选用连续 20 d 的测量数据,共  $(20 \times 24 \times 60)/5 = 5\,760$  个数据点。使用真实网络带宽数据进行仿真实验时,考虑到测量数据一定小于物理链路带宽,因此,本文对真实数据进行了线性放大处理,并在放大实际数据量的同时,保留了原始数据良好的周期性和波动性。

在对路径规划的仿真过程中,选择在任一子网内模拟用户请求和系统服务过程。设置子网内的视频总数  $I = 300$ ,视频  $v_i^k$  的流行度分布服从如下的 Zipf-like 分布<sup>[17]</sup>:

$$p_i^k = \frac{i^{-\psi}}{\sum_{n=1}^I n^{-\psi}}, i = 1, 2, \dots, I \quad (4)$$

其中,  $\psi$  为倾斜系数,本次实验中  $\psi = 0.7$ 。

仿真中请求的到达过程符合参数为  $\lambda$  的泊松过程<sup>[18]</sup>,会话时长符合文献[19]分布,并设平均时长为 50 min。其他子网仍使用采集的真实网络流量数据作为背景流量。设定总仿真时长为 500 min。

#### 3.2 资源虚拟化动态调整

当网络流量大于分配的资源阈值时,可以认为网络中会产生拥塞、丢包等现象。选用仿真过程中产生拥塞的次数作为性能指标,分别测试并统计不同放大倍数下的策略性能。为更好地反映动态调整的效果,仿真实验中加入了 2 组对照实验:无动态调整策略和理论最大流限制策略,实验结果如图 3 所示。其中,理论最大流是指在给定网络拓扑下,不考虑不同区域流量间的相互影响时各独立区域所能达到的网络最大流,该值即为网络理论服务能力的上限。

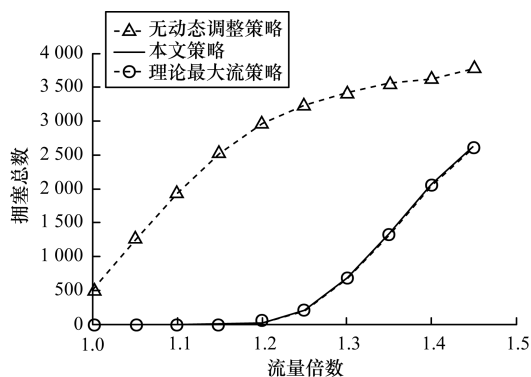


图 3 3 种方案拥塞总数统计

由图 3 可以看出,本文提出的动态调整策略能够对分配方案进行有效调整,大幅降低了拥塞次数,在满负载前(放大倍数小于 1.20),该策略几乎不产生拥塞;当网络满载后(放大倍数大于等于 1.20),该策略产生的拥塞数略高于理论最优情况,但明显优于无调整的情况。综上,本文提出的动态调整策略能够显著提升网络服务能力。

#### 3.3 路径规划

在上层路径规划过程中,因为考虑到各子网规划问题的独立性,所以仅在一个子网内部仿真视频请求,其余子网均使用采集的真实流量数据作为背景流量。实验时,背景流量和泊松过程产生的服务均具有波动性,资源虚拟化过程会动态执行并为各子网分配合适的资源。在选中子网内部,每 100 min 对视频请求的流行度进行一次旋转,用来模拟用户区域流行度的变化情况。实验分别从请求波动性、服务接受性能和迁移代价三方面对本文策略进行验证。

首先验证请求波动性对本文策略的影响。因为对用户区域内的请求整体进行路径规划,所以单个用户请求的突发性综合表现为整个用户区域内视频流行度的变化。采用对视频编号进行旋转的方法<sup>[20]</sup>产生流行度的波动,旋转因子  $\pi$  表示波动的大小。选取请求到达率  $\lambda = 55$  使系统处于刚满载状态,多次实验得出请求拒绝率和迁移比例,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,本文策略能够较好应对视频流行度的波动变化。

表 1 旋转因子对本文策略影响统计 %

$\pi$	拒绝率 均值	拒绝率 标准差	迁移比例 均值	迁移比例 标准差
0	0.00	0.00	2.26	0.15
10	0.00	0.00	2.32	0.12
20	0.00	0.00	2.36	0.11
30	0.68	0.65	2.39	0.08
40	1.19	0.63	2.42	0.12
50	1.54	0.88	2.45	0.14

为了说明本文策略中采用流行度信息和最低负载对服务接入的指导性,使用请求拒绝率和路径迁移比例作为调整代价。在对比实验方面,选用文献[5-6]中的 CSP 算法。此外,随机策略作为网络技术中常用的手段,在实际应用中被广泛采用,因此,再挑选“动态调整(Dynamic Adjust, DA) + 随机接入(Random Access, RA)”策略作为另一组对比实验。DA + RA 策略是指当流行度发生变化后,对矩阵  $F^k$  进行与本文类似的动态调整,优化接入系统的服务

总量,但对每个服务采用随机化的方式接入,不考虑其他信息。表2给出了本文策略、DA+RA策略与CSP策略的拒绝率统计情况。由表2可以看出,本文策略和DA+RA策略的请求拒绝率远低于CSP策略,原因是CSP策略没有利用应用层的请求信息,其根据网络信息对路径进行动态规划,容易在物理网络中形成瓶颈资源,影响系统的整体性能。

表2 不同策略拒绝率对比

请求到达率/ (个·min <sup>-1</sup> )	拒绝率/%		
	本文策略	DA+RA策略	CSP策略
55	0.00	0.02	15.25
56	0.22	0.23	15.90
57	1.07	0.94	16.67
58	1.77	1.92	17.41
59	2.49	2.92	18.09
60	3.32	3.47	18.71
61	3.76	3.88	19.31
62	4.60	4.76	19.98
63	4.83	4.97	20.61
64	5.09	5.01	21.19

为说明本文策略对迁移代价的优化,在不同请求到达率下对不同策略进行迁移比例统计,结果如表3所示。从表3的数据中可以看出,本文策略的迁移比例明显低于CSP策略和DA+RA策略,原因是本文的接入指导策略能够避免由随机接入造成的盲目迁移,其通过有效减少视频流的迁移次数降低了系统的整体服务代价,而CSP策略因对请求进行了大量的拒绝,导致迁移比例低于DA+RA策略。

表3 不同策略迁移比例对比

请求到达率/ (个·min <sup>-1</sup> )	迁移比例/%		
	本文策略	DA+RA策略	CSP策略
55	2.32	11.50	7.27
56	3.22	11.62	7.29
57	3.97	11.61	7.31
58	4.27	11.63	7.41
59	4.56	11.63	7.49
60	4.66	11.76	7.44
61	4.72	11.94	7.57
62	4.82	11.86	7.61
63	4.85	11.89	7.66
64	4.89	12.12	7.99

综上,本文提出的分层策略充分利用视频流行度信息和网络负载状态,能在有限的性能损失下为视频流提供合适的路径。

## 4 结束语

本文提出一种分层优化的路径规划策略,该策略的底层优化保证了路径的连通性,对物理网络进行虚拟化的子网划分缩减了优化规模,充分利用视频的流行度信息降低了视频流迁移代价。考虑到实际应用中CDN的性能瓶颈,本文还提出一种基于队列调度的执行策略,通过数据包头部的标签保证数据的正确转发和带宽分配。该策略能够明显减少控制流表的下发和存储,使得其在大规模CDN上的应用成为可能。下一步将把网络路径规划与SMEC内部视频部署、SMEC自身部署相结合,通过对系统不同层面的资源进行综合优化,以提升SMEC平台的服务能力。

## 参考文献

- [1] JADHAV S, KAKADE V, KAMBLE S, et al. Media streaming applications using cloud [J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2016, 3(5): 2091-2096.
- [2] 北京原力创新科技有限公司. 云模式流媒体服务平台: 200910091537.2[P]. 2010-01-27.
- [3] 高翔宇. 一种POF控制器的实现与流量管理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [4] AKYILDIZ I F, LEE A, WANG P, et al. A roadmap for traffic engineering in SDN-OpenFlow networks [J]. Computer Networks, 2014, 71: 1-30.
- [5] XU C, CHEN B, FU P, et al. A dynamic resource allocation model for guaranteeing quality of service in software defined networking based cloud computing environment [C]//Proceedings of International Conference on Cloud Computing and Security. Berlin, Germany: Springer, 2015: 206-217.
- [6] YU T F, WANG K, HSU Y-H. Adaptive routing for video streaming with QoS support over SDN networks [C]//Proceedings of 2015 International Conference on Information Networking. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 318-323.
- [7] 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.
- [8] CASADO M, FREEDMAN M J, PETTIT J, et al. Rethinking enterprise network control [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(4): 1270-1283.
- [9] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: experience with a globally-deployed software defined WAN [C]//Proceedings of SIGCOMM'13. New York, USA: ACM Press, 2013: 3-14.
- [10] HONG C Y, KANDULA S, MAHAJAN R, et al. Achieving high utilization with software-driven WAN [C]//Proceedings of SIGCOMM'13. New York, USA: ACM Press, 2013: 15-26.

(下转第279页)

- [4] HE Peisong, JIANG Xinghao, SUN Tanfeng, et al. Double compression detection based on local motion vector field analysis in static-background videos[J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2016, 35: 55-66.
- [5] 黄美玲, 王让定, 徐 健, 等. 基于 DCT 系数统计特性的 HEVC 视频双压缩检测算法[J]. *光电子·激光*, 2015(4): 733-739.
- [6] SHANABLEH T. Detection of frame deletion for digital video forensics[J]. *Digital Investigation*, 2013, 10(4): 350-360.
- [7] ZHANG Zhenzhen, HOU Jianjun, MA Qinglong, et al. Efficient video frame insertion and deletion detection based on inconsistency of correlations between local binary pattern coded frames [J]. *Security & Communication Networks*, 2015, 8(2): 311-320.
- [8] 李晓梅. 基于残留噪声相关性的视频篡改检测算法[J]. *信息技术*, 2013(10): 103-105.
- [9] 苗立刚. 视频监控中的图像拼接与合成算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(4): 857-861.
- [10] 杨 婧, 任延珍, 汪肇翔, 等. 基于差异能量的监控视频篡改检测算法[J]. *信息安全学报*, 2013(9): 55-59.
- [11] 宋 怡. 基于时空域联合匹配的 video 篡改检测算法[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] MATHAI M, RAJAN D, EMMANUEL S. Video forgery detection and localization using normalized cross-correlation of moment features [C]//*Proceedings of Image Analysis and Interpretation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 149-152.
- [13] LI L, WANG X, ZHANG W, et al. Detecting removed object from video with stationary background [C]//*Proceedings of International Conference on Digital Forensics and Watermarking*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012: 242-252.
- [14] 李 倩, 王让定, 徐达文. 基于视频修复的运动目标删除篡改行为的检测算法[J]. *光电子·激光*, 2016(2): 182-190.
- [15] 王嘉萱, 苏育挺. 基于时序特征聚类的对象删除篡改检测[Z]. 2012.
- [16] 袁秀娟, 黄添强, 苏立超, 等. 基于边缘异常与压缩跟踪的视频抠像篡改检测[J]. *计算机工程*, 2014, 40(7): 267-271.
- [17] 刘雨青, 黄添强. 基于时空域能量可疑度的视频篡改检测与篡改区域定位[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2014(1): 61-71.
- [18] 郑 红, 李 钊, 李 俊. 灰度共生矩阵的快速实现和优化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(11): 2509-2515.
- [19] 薄 华, 马缚龙, 焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. *电子学报*, 2006, 34(1): 155-158.

编辑 刘 冰

(上接第 273 页)

- [11] SCHWARZ H, MARPE D, WIEGAND T. Overview of the scalable video coding extension of the H. 264/AVC standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(9): 1103-1120.
- [12] NIU D, XU H, LI B, et al. Quality-assured cloud bandwidth auto-scaling for video-on-demand applications [C]//*Proceedings of 2012 IEEE INFOCOM*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 460-468.
- [13] DONOHO D L. For most large underdetermined systems of linear equations the minimal  $L(1)$ -norm solution is also the sparsest solution[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(6): 797-829.
- [14] BRAUN W, MENTH M. Wildcard compression of inter-domain routing tables for OpenFlow-based software-defined networking [C]//*Proceedings of the 3rd European Workshop on Software Defined Networks*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 25-30.
- [15] 尹德斌, 谢剑英. 一种新的加权公平队列调度算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(4): 28-30.
- [16] MEDINA A, LAKHINA A, MATTA I, et al. BRITE: an approach to universal topology generation [C]//*Proceedings of the 9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001: 346-353.
- [17] QIU T, GE Z, LEE S, et al. Modeling channel popularity dynamics in a large IPTV system [C]//*Proceedings of the 7th International Joint Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*. New York, USA: ACM Press, 2009: 275-286.
- [18] YU H, ZHENG D, ZHAO B Y, et al. Understanding user behavior in large-scale video-on-demand systems [C]//*Proceedings of the 1st ACM SIGOPS/EuroSys European Conference on Computer Systems*. New York, USA: ACM Press, 2006: 333-344.
- [19] CHEN L, ZHOU Y, CHIU D M. Smart streaming for online video services [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2015, 17(4): 485-497.
- [20] WEI X, YANG J, XI H. A novel content updating policy based on dynamic storage balancing for clustered streaming media system [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 2031-2036.

编辑 吴云芳