

## 『基于 SDN 的流量工程』修改说明

非常感谢评审专家给我们一次修改稿件的机会，也感谢评审专家提出的宝贵意见。评审专家的具体意见对提升文章立意，改进文章质量极有帮助。具体的，针对评审们提出的意见，我们对文章进行了如下的修改：

### 问题 1

SDN 在业务量控制方面有很多算法和机制，作者论述了一些 SDN 在业务量工程方面的应用，但论述的不够深刻，在 SDN 的业务量优化的具体算法、机制方面论述略显不足，论述的其它 SDN 的应用：业务量的分析，故障的快速恢复，属于通用的业务量管理中的行为，论述的较为浅显，没有突出 SDN 在这方面的优势。

### 针对性修改

#### 1. 针对流量调度方法内容的完善

SDN 的应用场景主要是数据中心网络(DCN)，当前 DCN 中多采用 Clos 网络拓扑结构（如图 7），如胖树结构，位于底端的是服务器节点，中间是若干层交换机设备（一般包含边界、聚合和核心交换机三类）。DCN 中的交换机为服务器节点提供高速的互联通信功能，由于采用层次化的结构，所以服务器节点之间的通信路径有多条，如何在这多条路径之中进行通信负载的分配调度，实现路径上的负载均衡是基于 SDN 的流量调度工作的重点。传统的如 ECMP 的调度算法会造成大流量之间的冲突，以及小流量的饿死问题，归咎于未考虑多个路径的实时占用率。

SDN 通过集中的控制层动态的收集网络中链路使用信息，可以将流量更均匀的分配到多条路径上，较之于以往的 ECMP 算法，实现路径间更好的负载均衡。在这个过程中，两个主要的步骤是：

- 1) 通过交换设备中对流中包的计数等方式发现 elephant 流（流量大、持续时间长的流）。传统算法中的流量冲突和饿死问题都是由 elephant 流的不合理调度导致的，而如果对所有的流都进行调度处理会导致控制器端的拥塞；
- 2) 控制器结合当前后续路径占用情况为 elephant 流选择转发路径。

以上是对基于 SDN 流量调度工作的出发点和主要内容的分析，文中概述的 Hedera、Mahout、devoflow 以及 difane 方案都是基于 SDN 进行集中路径选择的方案。认真分析评审专家指出的算法机制方面论述的不足，我们主要做了以下几方面的修改：

- 1) 完善了对 elephant 流探测、发现过程的概述，细化研究界提出的几种典型方法的描述（小节 3.1.1、3.1.2 中对 Hedera 等算法的介绍，P10）；
- 2) 增加了方案中对选择后续路径算法的介绍，主要概述了 Hedera 方案中的全局首次适应算法和 Mahout 方案中的离线首次适应算法（小节 3.1.1, P10~P11）；
- 3) 原文中没有对服务请求的负载均衡工作进行介绍，故在本次修改中增加一小节对服务请求流量的相关调度方法进行概述（小节 3.1.3, P12）；
- 4) 对数据调度小节的总体介绍部分进行细化，重点分析了 SDN 进行流量调度的优势，并对具体的几类调度工作进行简要的分析介绍（小节 3.1, P10）

#### 2. 针对故障恢复部分内容的完善

故障管理是传统流量工程相关工作中的一个重要组成部分，也是为数据中心以及企业级网络提供通信服务的基本要求。有效的故障管理需要及时响应网络组件的故障，对可用的网络资源进行重分配，以保证服务的运行。SDN 将传统网络中分布式的控制逻辑集中

化，虽然提供了可编程和动态控制能力，也导致传统的分布式故障恢复协议在实施中缺乏效率和灵活性。所以，SDN 中故障恢复部分的主要研究工作是：如何结合 SDN 特性，设计数据层面和控制层面故障的探测和恢复机制。

针对评审提出的故障恢复部分论述较为浅显的问题，我们主要做了以下几方面修改：

- 1) 通过介绍传统网络中故障恢复的基本思路，引出 SDN 网络在故障恢复中可能存在的问题，然后分两个小节展开介绍。（第 4 节，P14）
- 2) 首先，将基于传统故障恢复机制的 SDN 错误恢复工作进行细致对比；（小节 4.1，P15 表格及相关介绍部分）
- 3) 在此基础上，增加对 3 类拓展工作的介绍，包括：a) 如何降低 SDN 中故障恢复的延迟；b) 如何降低访问控制器开销；以及 c) 如何将故障恢复功能从控制应用程序中解耦出来。分别分析了相关工作的主要内容和取得的成果；（小节 4.1，P15 小标题部分）

另一方面，对于集中式控制器存在单点失效故障的问题，我们进行了如下的扩充：

- 4) 细化控制器主、备份结构中同步协议的工作流程的介绍，细化控制器数目对延迟和可靠性影响的分析；（小节 4.2 CPRcovery 机制的介绍，P17）
- 5) 增加对备份器部署位置问题的研究工作的概述。（小节 4.2 倒数两个段落，P17）

### 3. 针对流量分析部分的完善

基于 SDN 的流量测量的相关工作概述中，我们主要从测量的方法、测量的应用、测量的部署角度，介绍了流量测量的框架、基于测量的网络正确态检测和测量所使用的资源的管理三部分内容。其中正确态的检测针对的是 OF 程序可能存在的配置错误，进行的模型或静态方法的检测，属于 SDN 网络所引入的一个新的问题；测量资源的分配中关注测量准确性以及如何降低测量中存储开销，针对的也是 SDN 中利用数据层进行测量任务记录的特征。

测量方法设计与网络参数评估是传统流量工程中的通用行为，但传统的测量工作中存在依赖额外硬件或软件配置，以及无法针对应用流进行细粒度测量的问题，SDN 的出现可以弥补这方面的问题。文中对基于 SDN 测量方法的信息采集、参数测量进行概述，针对评审提出的为突出 SDN 优势的问题，我们进行了如下增改：

- 1) 对 SDN 中网络参数的评估方法的介绍进行细化（小节 2.12，P6）；
- 2) 增加总结段落，分析传统测量方案的问题，和基于 SDN 测量的优势（小节 2.12，P7）。

## 问题 2

关于展望部分，对进一步改进和深入研究的问题，建议作者重新斟酌，切实抓住下一步 SDN 网络流量工程应抓住的新的思想和主要问题，以提高本综述的水平和质量。

### 针对性修改

基于我们对国际研究前沿的跟踪和对技术发展趋势的理解，结合相关文献中提出的研究问题，重新梳理了对基于 SDN 的流量工程的研究工作的展望。相应的修改如下（5.2 小节，P18）：

- 1) 调整对“故障恢复机制”进一步研究空间的叙述，将可研究点落在动态的预定义路径更新和存储资源优化上；
- 2) 调整“多控制器结构”进一步研究空间的叙述，突出跨区域、多种类、多数目控制

器之间的协同工作的研究意义；

- 3) 增加对“基于测量的软件定义安全”研究工作的展望，我们认为网络安全是 SDN 的一个重要应用，而流量工程技术在进行异常的检测和集中式的安全策略部署过程中扮演着重要作用，例如如何通过实时的流量测量发现异常的流量特征，相关的工作值得深入探讨；
- 4) 增加对“基于 SDN 的新型网络中的流量工程”研究工作的展望，通过 UPN (User Provided Networks) 与 SDN 结合的例子说明基于 SDN 的流量工程对于新兴网络技术的发展具有驱动作用。我们指出 SDN 将数据转发和控制逻辑解耦的特性有助于新兴网络技术的创新和部署，而基于 SDN 的集中式流量调度可以从全局角度为部署网络中应用流量进行路由，获得更好的网路性能。所以，研究两者的有效结合是一个有意义的课题。

### 问题 3

部分用词需更准确些，例如，P11 “流量工程技术能充分开发出 SDN 的特性，更好的发挥 SDN 在应用层面的优势。”其中“开发出”不妥，改为“利用”或“挖掘”较妥，因为特性是 SDN 网络自身固有的，不是开发出来的。

#### 针对性修改

通读全文，对用词不准确，语句不通顺部分进行细致的修改，并针对章节开始段落的衔接性和小节内容的概述部分进行了调整。

例如，将 2.3 节标题 “测量的资源管理” 改为 “测量资源的管理”；

例如，将 4.2 节中 “分别表示主控制器中”，“表示” 改为 “对应”。

### 问题 4

摘要质量还需提高。

#### 针对性修改

根据评审的意见，我们进一步结合文章的主要工作，对摘要内容进行了增改，增改后的版本如下：

作为一种新型网络架构,软件定义网络 (Software Defined Networking, SDN) 将网络的数据层和控制层分离,通过集中化控制和提供开放控制接口,简化了网络管理,支持网络服务的动态应用程序控制.流量工程通过对网络流量的分析、预测和管理,实现网络性能的优化.在 SDN 中开展流量工程,可以为网络测量和管理提供实时集中的网络视图,灵活抽象的控制方式以及高效可扩展的维护策略,具有突出的研究意义.本文对基于 SDN 的流量工程相关工作进行了综述.分别从测量的方法、应用和部署角度出发,对 SDN 中流量测量的基本框架、基于测量的正确态检测以及测量资源的管理进行概述.分析传统网络流量调度方案的问题,介绍 SDN 中数据流量和控制流量调度的主要方法.从数据层和控制层两个方面概述 SDN 中故障恢复方法.最后,总结并展望了未来工作.

相应的，对英文摘要也进行了对应的修改。

再一次感谢专家和评审老师提出的宝贵意见，祝老师工作顺利！