



北京邮电大学
Beijing University of Posts and Telecommunications



2015141001-ZQ

硕士研究生学位论文阶段报告

学 号： 2015141001

姓 名： 韩波

学 院： 网络技术研究院

专业(领域)： 计算机技术

研究方向： 服务计算与云计算

导师姓名： 章洋

北京邮电大学

2017 年 9 月 14 日

论文题目	发布/订阅系统在 SDN 网络中的实际应用与研究		
论文类型	基础研究	选题来源	973、863 项目
开题日期	2016-12-15	是否开题题目	是
论文开始日期	2016-12-15	报告日期	2017-09-15
报告地点	新科研楼 602	报告时间	上午 10:00-10:30

研究内容简介

一、选题背景

IT 产业的日新月异使得网络规模变得日趋庞大，网络结构也变得错综复杂，传统的网络结构逐渐无法满足人们的需求，大规模、异步式网络架构急需一种新模式来解决信息交互、结构管理等问题，降低网络设备之间的耦合性，从而获得更好的交互体验。

发布-订阅 (publish - subscribe) 模式是一种消息传播模式，消息的发送者 (发布者) 不会将消息直接发送给特定的接收者 (订阅者)。而是将发布的消息按主题分类，把带有主题的消息传送给网络节点，而无需对订阅者 (如果有的话) 有所了解。同样的，订阅者可以表达对一个或多个类别的兴趣，只接收感兴趣的，消息，无需对发布者 (如果有的话) 有所了解。这样就大大降低了发布者和订阅者之间的耦合度，消息的生产者与消费者实现了脱离，可以更好地完成消息的交互。这种发布者和订阅者的解耦可以允许更好的可扩展性和更为动态的网络拓扑。

SDN (Software Defined Network, 软件定义网络) 是一种新兴的基于软件的网络架构及技术，顾名思义就是使得网络可编程，程序员可以自己编写程序、下发流表来控制网络设备的行为，让网络的可拓展性、开放性大大增强。SDN 的最大特点在于具有松耦合的控制平台与数据平台、支持集中化的网络状态控制、实现底层网络设施对上层应用的透明。控制平台和转发平台的分离、支持全局的软件控制是 SDN 的核心理念。在 SDN 架构中，SDN 交换机负责网络数据的高速转发，SDN 控制器保存用于进行转发策略的转发表信息，控制器通过控制器的南向接口 OpenFlow 对网络中所有的 SDN 交换机进行集中化统一管理。

本系统基于 SDN 对传统网络的发布/订阅系统进行改造升级，将发布/订阅系统真正应用到真实的 SDN 网络环境中，用 OpenFlow 交换机代替虚拟交换机，并将原有系统的功能集中到新系统中，完成基本功能的迁移。本课题主要研究点在于基于全局优化策略对 SDN 交换机的优先队列进行统一调配和管理。根据新型队列长度的获取方法实时、准确的获取队列拥塞程度，进而根据调整策略调整队列带宽。同时，我们根据用户的实际需求，在实际数据转发能力范围内尽量满足用户，为不同等级的用户提供不同质量的服务，提供更加优质可靠的 QoS。

二、研究内容

基于 SDN 的发布/订阅系统是一个软硬件结合、以软件为主的网络应用系统，其目的是借助 SDN 网络高度集中式管理、可编程的、可动态改变的特点，解决传统网络中无法保证的数据时效性、安全性等问题，构建一个可控且可靠的统一消息中间件网络。

借助 OpenFlow 协议实现 SDN，在网络中实现了软硬件的分离以及底层硬件的虚拟化，从而为网络的发展提供了一个良好的发展平台。转发层和控制层的分离，对发布/订阅系统的性能提升有很大的帮助。目前，该系统在拓扑维护、路由计算、发订管理、消息转发性能优化等方面已经初具模型，在自行搭建的测试环境中也取得了一些阶段性成果。系统架构自上而下依次是接口层、路由层和转发层，层内仅负责各自的业务逻辑，层间通过接口通信，耦合度较低，便于后续进行系统维护和功能拓展。架构图如下所示。

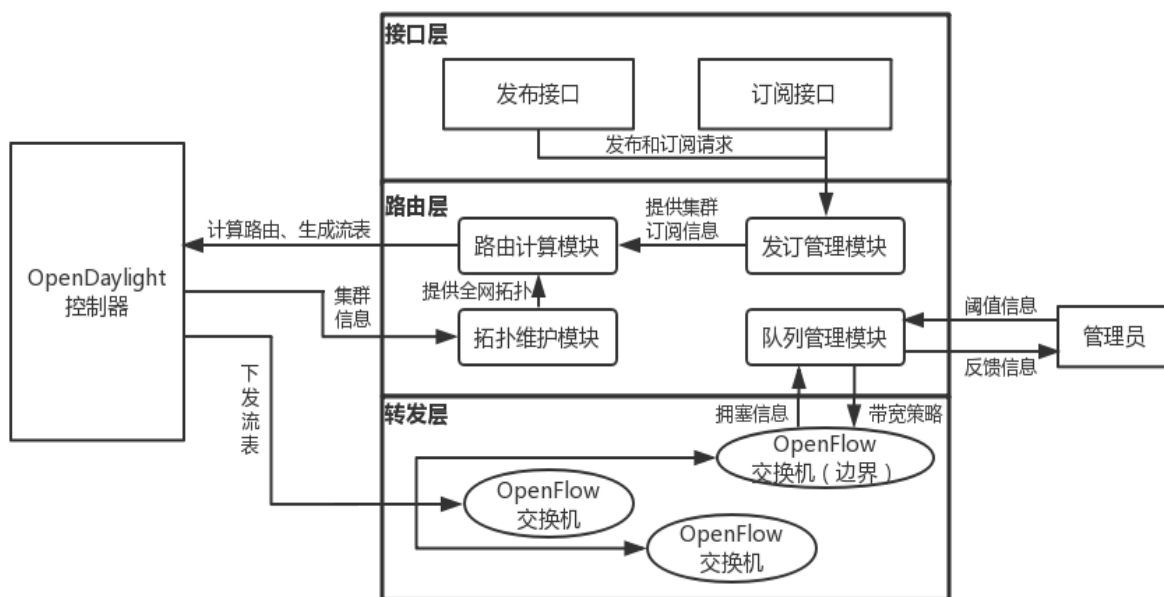


图 1 发布/订阅系统架构图

本课题主要研究内容为基于全局策略的队列带宽调整和 QoS 优化，在原有系统上进行算法改进，增加全局管控策略，综合考虑用户的实际需求，充分利用交换机的带宽资源，管理节点和网络节点互相影响、互相牵制，共同提供优质的服务质量。

本课题充分调研基于传统网络的发布/订阅系统功能机制和阅读大量相关文献和已发表论文，基本研究内容如下：

1. 基于用户需求的队列带宽调整算法

由系统架构图可以看到，队列管理模块作为核心层次的重要组成部分，对 QoS 的质量起着至关重要的作用。队列管理策略，即通过队列的拥塞程度调整队列带宽的策略，而队列的拥塞程度则根据平均队列长度和队列带宽综合得到。在以往的做法中，平均队列长度是根据随机早期检测公式得出，而实时队列长度根据进出队列的字节数计算得出，这种做法得出的结果与实际值有较大的出入。本课题通过大量测试提出了一中新型计算方法能够有效避免以往方案的缺点，使得平均队列长度的获取更加准确，带宽资源分配更加合理。

在准确获取平均队列长度之后，我们要进而根据平均队列长度判断队列的拥塞程度。在一定程度上，队列拥塞程度与丢包率呈正相关，因而我们可以根据丢包率的大小判断队列程度的严重程度。丢包率跟发包频率和出包速率有关，经大量测试证明，在发包频率相对稳定时，丢包率也维持一个相对稳定的值。基于此，我们获取了队列的拥塞程度。

接下来，我们根据事先确定和全局策略和用户需求对不同优先级的队列进行带宽调整，在交换机的转发能力范围内尽量满足用户的需求。若用户需求超出交换机的转发能力范围，管理节点会通知用户重新商定一个双方均能接受的阈值重新进行上述过程。

2. 基于全局带宽调整的优化策略

对于某一个主题，订阅者在订阅成功后可以根据实际情况（付费标准等）在订阅消息的同时提出一个时延要求作为消息从发布者到订阅者的时延约束，亦即端到端时延。在转发树中可能存在多个订阅者，每个订阅者都会提出自己的时延约束，这就会针对一个特定主题形成一个约束集。

而对路径中的每一跳即每个 SDN 交换机而言，会有一个最低的时延下限，其值与交换机性能、端口带宽、线路标准有关，是一个固定值，记为，交换机只能保证在此下限之上的时延约束。但由于不同的节点在网络中的位置不同，导致节点的时延要求也不同。对整个转发树而言，从发布者到所有订阅者的时延应尽量满足用户提出的需求，即管理员分配的时延阈值应满足两个要求，一要满足路径上所有节点时延之和小于用户的需求，二要保证单个节点要在转发能力范围内。

在分配带宽时我们有一个原则：即选择最佳适应算法尽量接近用户的需要，根据每个节点的最低时延比例来分配每个节点的时延约束，可得出每个节点每条线路的时延要求，在此基础上计算出

最低时延要求作为节点时延配比。

如果上述两个条件满足，管理员按照计算出的时延阈值作为交换机的时延参照并下发到交换机所在的控制器作为本地调整参照；如果无解，管理员通知订阅者该标准无法满足，双方协商一个新的时延约束继续上述过程。

初始化完成之后，管理员还要对时延配比进行实时调整，而调整的基础是节点的实时反馈。当前队列长度可以用交换机提供的接口通过一定的计算方式获得，而平均队列长度则采用随机早期检测公式。本地控制器将该实际处理时延反馈给全局管理员，管理员按照公式重新计算每个交换机的时延约束。如果计算无解，说明此时交换机无法满足当前的传输速率，管理员则通知消息的发布者降低发包频率；否则管理员将此新的时延约束下发至交换机控制器

3. 基于 SDN 网络设备的流量管理

现有网络中，对流量的控制和转发都依赖于网络设备实现，且设备中集成了与业务特性紧耦合的操作系统和专用硬件，这些操作系统和专用硬件都是各个厂家自己开发和设计的。在实际应用中很难人为的控制其转发的行为，在灵活性等方面有着很大的不便。在 SDN 网络中，网络设备只负责单纯的数据转发，可以采用通用的硬件；而原来负责控制的操作系统将提炼为独立的网络操作系统，负责对不同业务特性进行适配，而且网络操作系统和业务特性以及硬件设备之间的通信都可以通过编程实现。因而流量信息需要集中统一的管理。

就本系统而言，流量管理主要集中在管理节点。共有流量信息统计、流量分析、流量管控三部分，其中流量信息统计依靠 SDN 网络控制器提供的 RestAPI 解析 json 对象获取。流量分析是将收集到的流量信息按照事先约定的规则进行对比，进而判断流量是否异常。流量管控是在流量异常的情况下通过网络控制器下发管控命令，限制端口速率或非法用户等，实现系统相对稳定、干净的运行。同时将收集到的流量数据按照一定的格式展示在管理节点的控制台上，方便管理者实时监控各个网络设备的流量信息。

4. 用户接口层与节点间的规范化校验

就发布/订阅系统架构而言，系统可分为接口层、路由层和转发层，节点在系统中扮演着重要的角色，既要监听来自网络的消息，又要监听来自用户的发布或者订阅。但是，为了净化 SDN 网络环境，使宝贵的带宽等网络资源都能得到有效利用，节点有必要对用户发布的数据做一下过滤，防止其肆意发布无用信息。在基于传统网络的系统中，用户和节点之间是通过 WebService 建立联系的，用户每发布一条消息都要手动添加各种标签，既麻烦又耗时。在 SDN 网络环境中，用户与节点之间变成 REST 方式（见设计内容三），用户发布的是 json 对象，这比原来的方式有了很大的改进。但是，系统消息域中传播的消息是序列化的数据包，消息一旦进入消息域就要占用网络资源。本部分课题在充分思考上述过程后拟设计一个消息校验机制，在节点把消息推向消息域之前，用 Schema 或者其他校验工具校验消息的合法性，比如通过反序列 json 对象或 XML 文件能够得到节点认可的类对象，符合用户对某个主题的兴趣等，保证节点推向消息域的消息是合法有效的，以此使得网络资源得到充分利用。

5. 基于 Restful 风格的发布/订阅接口实现

在基于 SDN 网络的发布/订阅系统中，当一个新的节点加入到网络中时会发布一个 webservice 服务，该服务用于接收发布者和订阅者的发布（取消发布）和订阅（取消订阅）注册，也用于接受由其他集群转发过来的消息。换言之，消息在 SDN 网络中的传播是基于 SOAP 和 XML 的。然而，webservice 有一定的弊端，比如效率较低、发布的服务有数量限制，端口占用等。对比之下，REST 方式的高效率、高易用性、高可伸缩性等特点优势突出。它把网络上所有的事物都定义为资源，每个资源都有统一的资源定位符，所有操作都是无状态的，省去了上下文的约束，无需进行会话保持，具有极大的灵活性和易用性。

本课题拟设计一套 RestAPI，把对应不同主题的发布和订阅信息都统一设计成网络中的资源，设计唯一的资源定位符，发布和订阅的注册过程将采用 REST 方式实现。在发送端，若发现数据包过大，则将该消息分包，每一个数据包都携带分包信息，这样在接收端就可以根据分包信息将各个分包组装成完整的消息。接收端收到消息后，首先解析消息的 package 属性，若该消息没有经过分包，或者允许将各个分包单独向用户推送，则直接启动推送流程；否则解析消息的 identification 属性，根据消息 id 查看系统中是否存在该条消息的组包流程，若存在，加入该流程，若不存在，

为这条消息启动一个新的组包流程。每向一个组包流程中加入一个分包时，检测该组包流程是否完成，若已完成，则启动向用户递交的流程，使发布/订阅具有更好的普适性。

三、关键技术

本课题基于 SDN 网络，将发布订阅系统部署在物理交换机中，利用物理器件的高性能充分发挥 SDN 的优势。多级优先队列的设计，基于全局策略的实时带宽调整，与用户的实际需求相结合，真正把 SDN 运用到用户层面，提供复杂高效的 QoS。本课题关键技术主要有如下几个方面：

1. SDN 本身代表了网络技术的前沿。它是斯坦福大学的 Clean Slate 项目的最新研究成果，提供了在真实网络环境中部署、测试创新的网络体系和协议的平台。与传统的网络架构不同，它的核心思想是网络数据转发平面和控制管理平面的分离。在传统 IP 网络中，网络传输设备（例如：路由器）需要分别负责数据转发功能和控制逻辑功能，因此传统网络的控制管理逻辑非常复杂。而在软件定义网络 SDN 中，控制平面和数据平面分离的这种架构使得网络传输设备的功能变得简单，只需要负责转发数据，网络传输设备原本的控制功能则都交由上层的控制实体来完成。SDN 不仅提高了网络的传输性能，同时也使得网络的管理控制变得灵活、可扩展。

2. 发布/订阅系统在物理网络环境中的实际应用。SDN 是一项相对前沿的技术，对此有深入研究的人数量相对较少，而且一般都局限于虚拟网络环境，像现在比较流行的 OpenVSwitch 虚拟交换机、OfSoftSwitch 交换机、Mininet 等。可以说大多数对 SDN 的研究还只是停留在理论上，并没有真正利用到实际网络环境中来。

本课题在充分了解基于 SDN 的发布/订阅系统基础上，经过虚拟网络的编码测试后移植到实际的 OpenFlow 交换机中运行，让 SDN 真正用到物理环境中来，实现软件定义网络。这是本实验室 SDN 研究的一项应用型突破。

3. 一种新型 QoS 机制：多级队列。传统的网络环境下的队列多为单队列，即使是多队列也只能做适当微调。在基于 SDN 网络环境下的发布/订阅系统中的队列会分成三个拥有不同带宽的队列。在可控环境下会根据当前消息的优先级和当前的实时网络环境来决定消息的入队列行为，这样的队列管理机制可以提高消息的转发效率。

四、论文计划

时间	研究内容	预期效果
2016.12-2017.2	查阅资料，熟悉系统开发平台；构思设计方案	对课题用到的各项技术了解深入，设计方案有了明确认知
2017.3-2017.7	完善设计方案，编码实现，并将完整系统在虚拟环境中试运行	系统编写完成，虚拟环境中运行良好
2017.8-2017.10	完善系统，租借实体 OpenFlow 交换机，测试运行	在实体环境中运行状况基本良好
2017.11-2018.2	撰写论文	论文撰写完毕
2018.3	论文答辩	答辩通过

五、论文进度及目标

本课题基于 SDN 网络设计并完善发布订阅系统，利用 SDN 控制和转发分离的特性提高数据转发效率，增强消息传递的实时性和可靠性。大致内容主要包含以下内容：一是局部交换机端口队列带宽调整算法设计和优化，二是基于全局策略和用户需求的时延配比、带宽调整，三是管理节点对全局流量的变化分析管控。本课题在实际 SDN 交换机上进行了大量的测试，验证带宽调整算法的有效性，测试端到端消息传输时延，证明本课题的有效性和实用性。

当前阶段，在实际 SDN 环境下进行大量测试，优化了原有系统对优先队列平均队列长度的获取方法，通过丢包率的变化获取队列拥塞情况，同时用单终端环回测试验证数据包的真实时延，验证本课题提出的平均队列长度获取方法的有效性，为后续的项目进展提供了大量理论依据。

代码方面，功能代码已经完成，单元测试通过，但尚未进行有效的集成测试。

下一阶段的主要内容为：

2017. 9. 15-2017. 11. 15 完成剩余代码编写和联调测试，包括管理节点和普通网络节点和功能性连接，综合全局策略和用户需求，实现一个完整的带宽调整机制。

2017 年 11. 15-2017. 12. 15 测试报告和论文撰写，计划在 12 月中完成初稿。

论文进展情况

一、工作计划

就目前状况而言，已有两个各自独立的代码工程，分别在各自搭建的环境中测试运行。两个系统基本实现了路由计算、拓扑维护、订阅管理和队列管理，为本课题的研究提供了基本框架和理论支持。在原有系统可行的基础上本课题即可迅速开展。另一方面，已搭建一个基于 OpenFlow 交换机的简单 SDN 网络，为本课题的网络环境搭建做了一定的调研和探索工作，实验工具和经验可为本课题的完成提供很大帮助。

本课题的研究分四个阶段：前期调研阶段、编码实现阶段、联合调试阶段和测试发布阶段。不同阶段需要不同的研究基础和工作条件。

前期调研阶段。本阶段主要是深入了解现有系统的运行机制，了解各自的最初设计方案和目前的实现情况，接下来的工作如何开展。了解功能整合可能遇到的困难，设计原有功能的迁移方案，为接下来的工作做好充分的准备。

编码实现阶段。严格按照设计方案展开代码编写工作，在编码的过程中要不断对原有的设计进行反思和试验，并根据具体情况对计划进行修改。本阶段要求比较高的代码编写能力以及问题解决能力。

联合调试阶段。本阶段主要是设计完整合理的测试方案，将整合后的完整代码工程在自行搭建的测试环境中运行，找出出现的问题并解决。

测试发布阶段。本阶段主要工作是测试和完善在联合调试之后的整体代码。此部分有功能测试和性能测试，应先完成功能测试后进行性能测试。

二、实际进展情况

当前阶段，在实验网络上，相比论文开题时得到了较大的完善，目前实验室已购得 3 台 Pica8 SDN 交换机，基于此搭建了小型物理 SDN 网络，为本课题提供了完整的实验环境。

在项目框架和代码编写上，当前阶段通过提出增量差法已经完成平均队列长度的准确获取，进而通过公式计算出理论丢包率来判断队列的拥塞情况，根据拥塞程度的大小和优先级的高低综合分配三条队列的带宽，在充分利用带宽资源的同时尽量保证高优先级消息的优先转发，提供更优质的服务。此外，由于管理员需要参与节点阈值的定量，故管理员和节点的交互也是本课题的重要部分。目前这些内容已经基本完成，正在测试效果。

论文撰写上，目前处于开始阶段。

工作成果

一、已完成学位论文工作的内容

就目前状况而言，已有两个各自独立的代码工程，分别在各自搭建的环境中测试运行。两个系统基本实现了路由计算、拓扑维护、订阅管理和队列管理，为本课题的研究提供了基本框架和理论支持。在原有系统可行的基础上本课题即可迅速开展。另一方面，已搭建一个基于 OpenFlow 交换机的简单 SDN 网络，为本课题的网络环境搭建做了一定的调研和探索工作，实验工具和经验可为本课题的完成提供很大帮助。

前期调研阶段已完成。本阶段需要对课题中提到的 SDN 网络协议、控制器操作、OpenvSwitch 开源工具以及所需物理设备进行调研，并设计系统结构，深入学习了基于 SDN 网络的发布/订阅管理系统，重点是其路由算法的思路及实现。需要较好的英文读写能力、文献阅读能力以及对实现工具的选择和判断，硬件上需要个人计算机和 SDN 网络交换机。

在实验环境搭建上，相比论文开题时得到了较大的完善，目前实验室已购得 3 台 Pica8 SDN 交换机，基于此搭建了小型物理 SDN 网络，为本课题提供了完整的实验环境。

在项目框架和代码编写上，当前阶段通过提出增量差法已经完成平均队列长度的准确获取，进而通过公式计算出理论丢包率来判断队列的拥塞情况，根据拥塞程度的大小和优先级的高低综合分配三条队列的带宽，在充分利用带宽资源的同时尽量保证高优先级消息的优先转发，提供更优质的服务。此外，由于管理员需要参与节点阈值的定量，故管理员和节点的交互也是本课题的重要部分。目前这些内容已经基本完成，正在测试效果。其中带宽调整算法示意图如图 4 所

示：

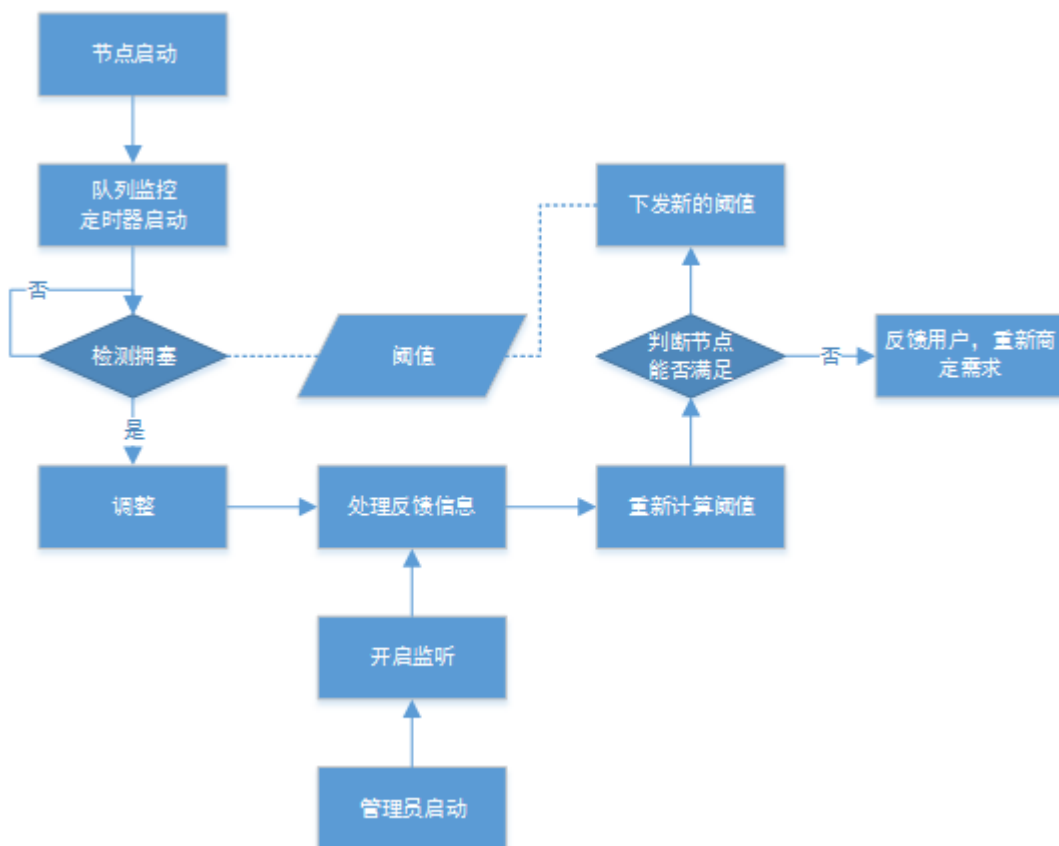


图4 算法调整示意图

基本的单元测试已经完成。联合调试和性能测试正在进行。

二、取得的阶段性成果

1. 理论研究成果

SDN 网络：SDN 是斯坦福大学的 Clean Slate 项目的最新研究成果，提供了在真实网络环境中部署、测试创新的网络体系和协议的平台。与传统的网络架构不同，它的核心思想是网络数据转发平面和控制管理平面的分离。在传统 IP 网络中，网络传输设备（例如：路由器）需要分别负责数据转发功能和控制逻辑功能，因此传统网络的控制管理逻辑非常复杂。而在软件定义网络 SDN 中，控制平面和数据平面分离的这种架构使得网络传输设备的功能变得简单，只需要负责转发数据，网络传输设备原本的控制功能则都交由上层的控制实体来完成。SDN 不仅提高了网络的传输性能，同时也使得网络的管理控制变得灵活、可扩展。

一种新型 QoS 机制：多级队列。传统的网络环境下的队列多为单队列，即使是多队列也只能做适当微调。在基于 SDN 网络环境下的发布/订阅系统中的队列会分成三个拥有不同带宽的队列。在可控环境下会根据当前消息的优先级和当前的实时网络环境来决定消息的入队列行为，这样的队列管理机制可以提高消息的转发效率。

2. 实验研究成果

实验环境的搭建基于实体 SDN 交换机。实验网络拓扑示意图如图 5 所示。

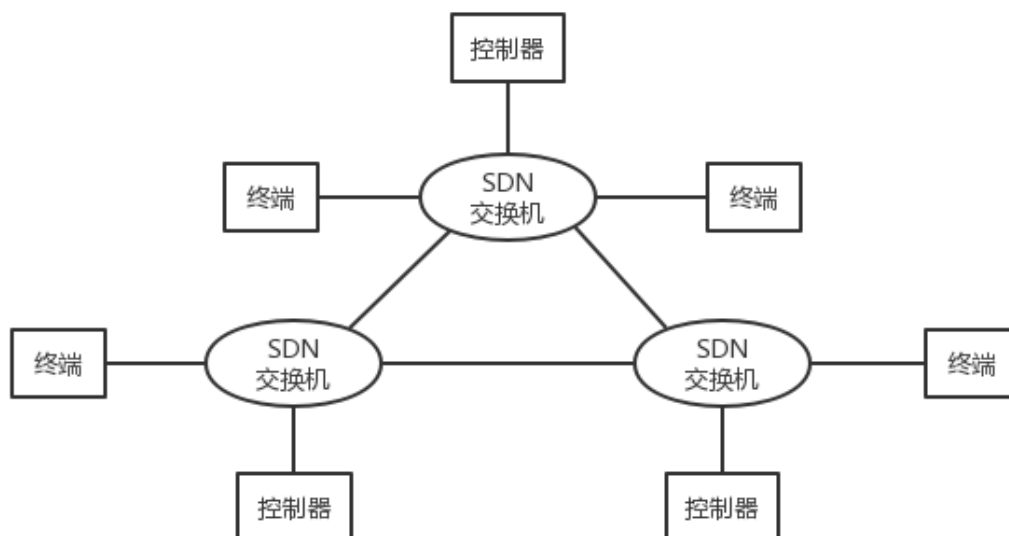


图 5 实验网络拓扑示意图

基于 Apache CXF 完成一套标准的 RESTful API。与当前 Web Service 接口并行使用。实验结果显示 REST 接口在吞吐量和速度方面相比 Web Service 都有明显提升

三、主要创新点

1. SDN 本身代表了网络技术的前沿。它是斯坦福大学的 Clean Slate 项目的最新研究成果，提供了在真实网络环境中部署、测试创新的网络体系和协议的平台。与传统的网络架构不同，它的核心思想是网络数据转发平面和控制管理平面的分离。在传统 IP 网络中，网络传输设备（例如：路由器）需要分别负责数据转发功能和控制逻辑功能，因此传统网络的控制管理逻辑非常复杂。而在软件定义网络 SDN 中，控制平面和数据平面分离的这种架构使得网络传输设备的功能变得简单，只需要负责转发数据，网络传输设备原本的控制功能则都交由上层的控制实体来完成。SDN 不仅提高了网络的传输性能，同时也使得网络的管理控制变得灵活、可扩展。

2. 发布/订阅系统在物理网络环境中的实际应用。SDN 是一项相对前沿的技术，对此有深入研究的人数相对较少，而且一般都局限于虚拟网络环境，像现在比较流行的 OpenVSwitch 虚拟交换机、OfSoftSwitch 交换机、Mininet 等。可以说大多数对 SDN 的研究还只是停留在理论上，并没有真正利用到实际网络环境中来。

本课题在充分了解基于 SDN 的发布/订阅系统基础上，经过虚拟网络的编码测试后移植到实际的 OpenFlow 交换机中运行，让 SDN 真正用到物理环境中来，实现软件定义网络。这是本实验室 SDN 研究的一项应用型突破。

3. 一种新型 QoS 机制：多级队列。传统的网络环境下的队列多为单队列，即使是多队列也只能做适当微调。在基于 SDN 网络环境下的发布/订阅系统中的队列会分成三个拥有不同带宽的队列。在可控环境下会根据当前消息的优先级和当前的实时网络环境来决定消息的入队列行为，这样的队列管理机制可以提高消息的转发效率。

计划及进度安排

本课题基于 SDN 网络设计并完善发布订阅系统，利用 SDN 控制和转发分离的特性提高数据转发效率，增强消息传递的实时性和可靠性。大致内容主要包含以下内容：一是局部交换机端口队列带宽调整算法设计和优化，二是基于全局策略和用户需求的时延配比、带宽调整，三是管理节点对全局流量的变化分析管控。本课题在实际 SDN 交换机上进行了大量的测试，验证带宽调整算法的有效性，测试端到端消息传输时延，证明本课题的有效性和实用性。

当前阶段，在实际 SDN 环境下进行大量测试，优化了原有系统对优先队列平均队列长度的获取方法，通过丢包率的变化获取队列拥塞情况，同时用单终端环回测试验证数据包的真实时延，验证本课题提出的平均队列长度获取方法的有效性，为后续的项目进展提供了大量理论依据。

代码方面，功能代码已经完成，单元测试通过，但尚未进行有效的集成测试。

下一阶段的主要内容为：

2017.9.15-2017.11.15 完成剩余代码编写和联调测试，包括管理节点和普通网络节点和功能连接，综合全局策略和用户需求，实现一个完整的带宽调整机制。

2017 年 11.15-2017.12.15 测试报告和论文撰写，计划在 12 月中完成初稿。

问题及整改方案

目前核心代码尚未完成，时间紧任务重，需要尽快完成核心代码，展开联调，同时进一步完善测试环境，以贴合实际应用的场景。

管理节点和网络节点的联调还有待进一步改进，目前只完成代码的编写，测试尚未展开，诸多问题未得到解决。计划在 9 月完成管理节点和网络节点的联调，结合用户的需求形成一套完整的服务体系。

第二部分内容有待进一步规划，紧密呼应第一部分内容，形成一个完整的系统。计划加紧完成设计方案，做出详细规划。

论文撰写上，目前处于开始阶段，计划加快测试进程，与测试并行论文的撰写，争取按计划于 12 月中完成初稿。

参考文献

- [1] E. Al-Shaer and S. Al-Haj. FlowChecker: Configuration Analysis and Verification of Federated Openflow Infrastructures. In Proceedings of the 3rd ACM SafeConfig Workshop, 2010.
- [2] J. C. Mogul, J. Tourrilhes, P. Yalagandula, P. Sharma, A. R. Curtis, and S. Banerjee. DevoFlow: Cost-effective Flow Management for High Performance Enterprise Networks. In Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets), 2010.
- [3] Z. Cai, A. L. Cox, and T. E. Ng. Maestro: A System for Scalable OpenFlow Control. In Rice University Technical Report, 2010.
- [4] M. Canini, D. Venzano, P. Peresini, D. Kostic, and J. Rexford. A NICE Way to Test OpenFlow Applications. In Proceedings of the Symposium on Network Systems Design and Implementation, 2012.
- [5] J. C. Mogul, J. Tourrilhes, P. Yalagandula, P. Sharma, A. R. Curtis, and S. Banerjee. DevoFlow: Cost-effective Flow Management for High Performance Enterprise Networks. In Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets), 2010.
- [6] Tomas Hegr, Leos Bohac, Vojtech Uhlik 等. OpenFlow Deployment and Concept Analysis[J]. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2013, 11(5).
- [7] Ma Haiyan, Yan Jinyao, Panagiotis Georgopoulos, Bernhard Plattner. Towards SDN Based Queuing Delay Estimation
- [8] 温鹏, 章洋. 高性能发布/订阅系统接口服务的设计与应用[J]. 软件, 2013, 34(11): 31-35
- [9] 王双锦, 章洋. 基于 OpenFlow 的发布/订阅系统中拓扑和路由子系统的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学网络技术研究院, 2015.
- [10] 臧亚强, 章洋. 基于 SDN 网络的发布/订阅模式统一消息中间件核心设计与实现[D]. 北京邮电大学, 2015.
- [11] 郑啸, 罗军舟, 曹玖新等. 基于发布/订阅机制的 Web 服务 QoS 信息分发模型[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(6): 1088-1097.
- [12] 左青云, 陈鸣, 赵广松, 等. 基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究[J]. 软件学报, 2013, 24(5): 1078-1097.
- [13] 刘昌威, 章洋. 基于 SDN 网络的发布/订阅中间件路由计算模块的性能优化[D]. 北京邮电大学, 2016.
- [14] 牛琳琳, 章洋. 基于 SDN 的发布/订阅系统拓扑维护及数据转发的研究与实现[D]. 北京邮电大学, 2016.

评审小组

姓 名	职 称	职 务	工 作 单 位
程渤	教授	组长	北京邮电大学
吴步丹	副教授	成员	北京邮电大学
章洋	副教授	成员	北京邮电大学
乔秀全	教授	成员	北京邮电大学

导师评语

已取得一定研究成果，符合培养方案要求，研究计划可行，可以继续完成论文！

导师：

日期： 年 月 日

阶段报告小组意见：

负责人：

日期： 年 月 日

学院意见：

负责人：

日期： 年 月 日（签章）