

一种 SDN 网络的故障自动恢复方案

洪硕果¹, 沈苏彬²

(1. 南京邮电大学 物联网学院, 江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

摘要:及时检测和恢复故障是评价网络实用价值的一个十分重要的指标。为了缩短服务中断时间,增强网络可靠性,有必要研究 SDN(软件定义网络)网络中的故障检测和恢复技术。基于对现有 SDN 网络中的两种故障恢复机制的特点及其限制的分析,提出了一种主动式和被动式故障恢复相结合的、综合考虑分组流服务质量需求的故障恢复方案。基于开源 OpenDaylight 控制器设计和实现了一个系统,采用异步告警和主动轮询方式检测网络故障,根据故障数目和受故障影响的流的业务属性对故障进行诊断,设置三种故障恢复模式:主动式、审议式和被动式。自动根据诊断结果对故障进行恢复。测试结果表明,该方案能自动地根据故障类型选用合适的恢复模式,并且恢复效果良好。

关键词:软件定义网络;OpenFlow;故障检测;故障恢复

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)11-0087-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.11.018

An Automatic Failure Recovery Scheme in SDN

HONG Shuo-guo¹, SHEN Su-bin²

(1. School of IoT, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China;

2. School of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: Detecting and recovering failure in time is a very important criteria for evaluating the practical value of network. For shortening the time of service disruption and enforcing the reliability of network, it is necessary to study the failure detection and recovery techniques in the SDN network. By analyzing the features of the existing two SDN failure recovery mechanisms and their limitations, a synthesized failure recovery approach combined with proactive recovery and reactive recovery schemes, including that considers the quality of service of packet flow, is proposed. A system based on open source OpenDaylight controller is designed and implemented, which uses asynchronous alert to detect network failures, and diagnoses failures depending on the number of failures and the service properties of flows affected by the failures. Three recovery modes, includes proactive, deliberative, reactive modes, are proposed to recovery automatically according to the diagnostic results. Test results show that the scheme can automatically choose proper recovery mode based on failure type, and the recovery effect is good.

Key words: SDN; OpenFlow; failure detection; failure recovery

0 引言

传统的分布式 IP 网络中控制逻辑和数据转发功能紧耦合在网络设备上,网络设备需要在数以千计分布式协议的控制下实施整个网络的智能化。这导致网络控制平面过于复杂,灵活性和扩展性很难适应网络的飞速发展^[1]。SDN(Software Defined Networking, 软

件定义网络)^[2-3]作为一种新型的可编程网络架构,将控制功能从网络设备中分离出来,移入逻辑上集中的控制软件—控制器中,用户可以通过编写软件的方式灵活定义网络设备的转发功能。这种结构实现了对网络的全局集中控制,降低了网络管理的复杂度,能够满足资源的灵活按需调用^[4]。SDN 作为一种快速发展

收稿日期:2015-02-10

修回日期:2015-05-14

网络出版时间:2015-11-04

基金项目:江苏省未来网络前瞻性研究资助项目(BY2013095-1-08)

作者简介:洪硕果(1990-),女,硕士研究生,研究方向为信息技术;沈苏彬,研究员,博士生导师,研究方向为计算网络、下一代电信网以及网络安全。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151104.0949.024.html>

的未来网络架构,对其研究具有重要意义。

及时检测和恢复故障是评价网络实用价值的一个十分重要的指标,网络短时间失效造成的服务中断会给用户带来巨大损失,保证网络的可靠性、可用性是网络应用的迫切需求^[5]。因此,有必要研究 SDN 网络的故障检测和恢复技术,利用控制器的全局管控能力,快速检测和准确定位故障,为受故障影响的流重新选择可用路由,自动完成故障恢复,增强网络可靠性。

文中首先介绍了 SDN 网络结构和 OpenFlow 规范特性;其次分析了 SDN 网络现有的两种故障恢复机制,并阐述了两者的局限性;然后提出一种主动式和被动式相结合的故障恢复方案,并根据故障数目和流的业务属性设计三种恢复模式:主动式、审议式和被动式;最后基于 OpenDaylight 控制器实现了故障自动恢复方案。

1 相关技术分析

1.1 SDN 网络结构

ONF(Open Networking Foundation,开放网络基金会)^[6]提出的 SDN 网络结构分为三层:最底层为数据层,由网络转发设备组成,主要负责数据处理、转发以及收集本地状态信息;中间为控制层,由逻辑上集中的控制器组成,用于控制管理数据层的网络设备,维护网络拓扑和状态信息等;最上层为应用层,包括各种不同的 SDN 业务应用。

SDN 控制器通过控制与数据层接口协议与网络设备进行通信,获取网络设备的链路、端口等资源状态,形成全局网络拓扑视图。网络控制逻辑由应用层实现,上层应用通过控制器提供的开放的可编程接口,实现对网络设备的分组转发控制和对网络设备的管理。此外,ONF 在控制与数据层接口上定义了开放的 OpenFlow 标准。

1.2 OpenFlow v1.3 规范

OpenFlow^[7]代表一种 SDN 控制与转发分离架构的实现技术,也是目前最受认可的控制器与交换机通信的接口协议。OpenFlow v1.3^[8]是 ONF 发布的一个稳定版本,文中基于 OpenFlow v1.3 研究 SDN 网络的故障恢复方案。OpenFlow v1.3 交换机结构如图 1 所示。

OpenFlow 交换机负责数据转发功能,通过 TCP/TLS 安全通道,使用 OpenFlow 协议与控制器通信。交换机内部由多级流表、一个组表和一个计量表构成,每个表中又包含若干表项。控制器通过向交换机部署流表项、组表项和计量表项来指导数据平面流量的转发。交换机在收到数据分组后,提取并解析分组头部信息,然后逐级与流表项进行匹配,并按照流表项中指定的

动作进行处理和转发;如果没有找到匹配的流表项,则将数据分组发送给控制器处理或者丢弃。

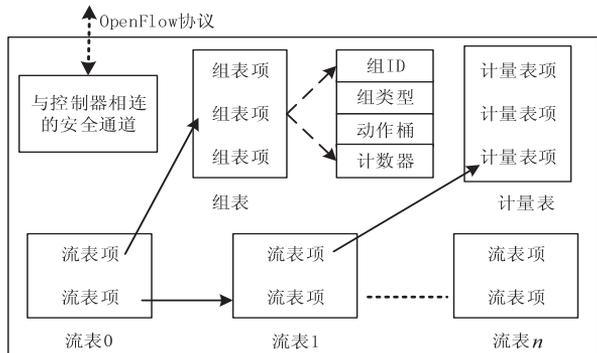


图 1 OpenFlow v1.3 交换机结构

组表项由组 ID、组类型、计数器和动作桶(Action Bucket)构成。组类型规定了动作桶中指令的执行方法,其中 Fast Failover 类型的组表项用于快速故障恢复。Fast Failover 组表项至少包含两个动作桶,每个动作桶都包含一个活动状态监测项,OpenFlow v1.3 引入了 watch port 和 watch group 两种监测机制。这些动作桶按次序排列,第一个处于活动状态的动作桶中的动作将会被执行。控制器利用 Fast Failover 组表项为交换机存储主路径和备份路径,当网络出现故障时,交换机可自动切换到备份路径,不需要与控制器交互。

1.3 故障恢复技术

SDN 网络中常见的两种故障恢复机制是恢复(restoration)和保护(Protection)机制^[9]。恢复机制是在网络出现故障后通告控制器,控制器重新计算新的路由并下发新转发规则给受影响的交换机。保护机制是控制器预先提供备份路径,在出现故障时交换机不需要请求控制器另外建立新路径,而是直接切换到备份路径。保护机制是主动式的策略,而恢复机制是被动式的策略。

文献[10]提出一种由控制器决策的被动式故障恢复方案,当检测到故障时由控制器动态地重新计算路由,但实验表明该方案不能满足运营商网络所需的 50 ms 的故障恢复时间。文献[11]采用 OpenFlow 的 Fast Failover 组表实现控制器向交换机下发主路径和备份路径,实验表明故障恢复时间可以达到 50 ms 的要求。但这种主动式的故障恢复模式只能解决主路径故障的情形,对于主路径和备份路径均出现故障的情形无法解决。显然,一种单一的解决方案不可能解决所有的故障问题。文中将主动式的保护机制和被动式的恢复机制相结合,提出一种自动化的故障恢复方案来解决所有的 SDN 网络故障情形。

2 方案设计

SDN 网络数据层面存在的故障主要包括交换机

节点和连接链路故障。网络中传送不同的业务流,在进行故障恢复时需要考虑流的业务属性,保证故障期间流的服务质量。

2.1 故障恢复模式

主动式的路径保护机制通过提前向交换机下发备份路径,可以实现快速的故障恢复。文中设计的故障恢复方案选用的最基本故障恢复模式是主动式模式,即在网络起始阶段,控制器通过 Fast Failover 组表项为每个流分别设定一条主路径和一条备份路径。根据 SDN 网络结构特点和前文分析的故障恢复机制的局限性,文中设计的故障恢复方案根据故障的数目和流的业务属性划分为三种故障恢复模式,如图 2 所示。

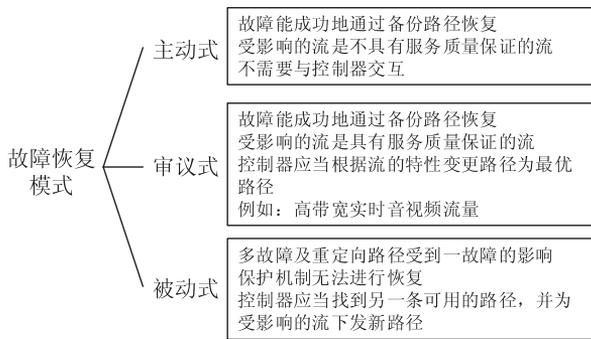


图 2 故障恢复模式

在单故障情形下,仅流的主路径出现故障,交换机通过备份路径即可恢复流的转发。然而,主路径一般是最优路径,在主路径出现故障时,备份路径不一定是当前网络环境下的最优路径。对于不具有服务质量保证的流,其对时延的要求不高,所以没有必要再重定向到一条最优路径,可以直接由交换机切换到备份路径。但是对于具有服务质量保证的流,例如一个实时高带宽的流,对时延、丢包率比较敏感,需要一条最优路径来满足其需求,因此采用审议式恢复模式重新计算一条最优路径,把具有服务质量保证的流从备份路径切换到最优路径。

但是对于主路径和备份路径均出现故障的多故障情形,只能采用被动式的恢复机制重新计算一条路径下发给受影响的交换机。虽然控制器可以为流下发多条备份路径用于处理多故障情形,但是这种方式会额外占用交换机的存储空间,并且对控制器产生较大的计算压力,因此在多故障情形下只能采用被动式恢复模式。

2.2 故障的诊断

对于每台交换机都维护一个端口故障集,将检测到的端口故障信息添加进对应的交换机故障集中,然后通过对故障数目和流的业务属性进行比较,根据比较结果采用对应的恢复模式。比较算法如下:

1 if(端口故障集中故障数目) = 1 &&(主动式路径保护机

制有效) = true

2 then

3 flowEntries = 获得受故障影响的流表项

4 for f 属于 flowEntries do

5 if (f 是具有服务质量保证的流) then

6 do 审议式故障恢复

7 else

8 do 主动式故障恢复

9 end if

10 end for

11 else if(组表项两个动作桶均失效)

12 do 被动式故障恢复

13 end if

根据 3GPP^[12]对网络业务的划分,会话类和流媒体业务对时延有较高的要求,对这两类业务需要提供服务质量保证。OpenFlow v1.3 协议定义的流表项匹配域中包含 IP DSCP(Differentiated Services Code Point, 区分服务码点)项,表示 IP 分组头部 ToS 字段的前六位,文中利用 DSCP 匹配项来区分流的业务属性。Cisco 推荐的 DSCP 值是:交互式语音 EF(101110)、交互式视频 AF41(100010)、流式视频 CS4(100000)。如果提取出的 DSCP 域值与上述三类有相同的,则可认定为是具有服务质量保证的流,采用审议式故障恢复模式。若 DSCP 域的值与上述三类都不同,则采用主动式故障恢复模式。

3 方案实现

该方案基于开源控制器 OpenDaylight^[13],目标是在 OpenDaylight 控制器上实现针对交换机节点和链路故障的自动恢复系统。主要采用 OpenDaylight 的 OSGi Java API^[14]实现对故障的检测,调用控制器配置数据库中的转发规则对故障进行诊断,根据诊断结果自动采用对应的恢复模式对故障进行路由恢复。接下来就从故障检测、诊断和恢复三个方面阐述系统的实现过程。

3.1 故障检测

故障检测的目的是及时发现 SDN 网络中已出现或将发生的故障。要发现网络故障,需要对网络运行状态信息做全面系统的收集。网络状态信息的收集一般有两种方式:异步告警—发生故障的交换机主动向控制器报告;主动轮询—由控制器定时查询各交换机的状态信息。

对于链路故障采用异步告警方式检测,当 SDN 网络中交换机之间的链路出现故障时,与该链路相连的交换机对应的端口状态会发生变化。交换机发现端口状态发生改变时,会立即触发 OFPT_PORT_STATUS 消息向控制器通告。控制器的 OpenFlow 插件收到端口

状态变化消息后,提取出端口信息并生成 RPC 事件通知给控制器的服务注册中心 MD-SAL。监听 MD-SAL 提供的网络设备清单变更接口 OpendaylightInventoryListener 能够实现对端口状态变更事件的订阅。通过订阅端口被删除方法可实现对链路故障的检测,代码如下:

```
public synchronized void onNodeConnectorRemoved(NodeConnectorRemoved notification) {
    NodeConnectorRef ref = notification.getNodeConnectorRef();
    InstanceIdentifier<NodeConnector> port = ref.getValue();
    NodeConnectorId portId = port.getId(); // 提取故障端口 ID
} // 获得故障端口的详细信息
```

对于交换机故障采用主动轮询方式检测,交换机与控制器建立连接之后,双方会不断地发送 Echo-request 和 Echo-reply 消息来保持连接。当交换机的电源供应中断、交换机自身完全崩溃或者交换机与控制器之间的连接中断后,该交换机就无法向控制器发送 Echo-request 和回复 Echo-reply 消息,控制器连续三次发送 Echo-request 消息都不能收到交换机的回复消息时,就认定该交换机出现故障。OpenFlow 插件完成对交换机节点故障的判定,并生成 RPC 事件通知给 MD-SAL。同样通过监听设备清单变更接口 OpendaylightInventoryListener 的 onNodeRemoved (NodeRemoved notification) 方法实现对交换机节点故障的检测。

3.2 故障诊断

故障诊断实现对故障的分类和比较,根据预设策略完成对故障恢复模式的判别,并将判别结果传递给故障恢复模块进行故障路由的恢复。

(1) 故障分类。

根据 2.2 节的分析,故障诊断模块以交换机为故障集,其中包含出现故障的端口号,如下所示:

$$\text{NodeID} := \{ \text{PortID1}, \text{PortID2}, \dots \}$$

其中,NodeID 代表交换机节点;PortID 代表出现故障的端口号。

当检测到端口出现故障时,就将其端口号加入到该交换机故障集中,当端口状态恢复到正常状态时,就从故障集中删除该端口号。

创建故障集 failureCluster 维护交换机端口故障信息,failureCluster 存储结构定义为 HashMap<String, List<String>>,Key 值代表出现端口故障的交换机 switch-Id,Value 值代表该交换机的故障端口集,其中包含故障端口号 failPortId。

(2) 故障比较。

故障比较模块需要查阅受端口故障影响的交换机的转发规则,包括流表项和组表项。本节利用 REST-CONF^[15] 接口从 OpenDaylight 控制器的配置数据库中

获取转发规则。完整的故障比较过程如图 3 所示。

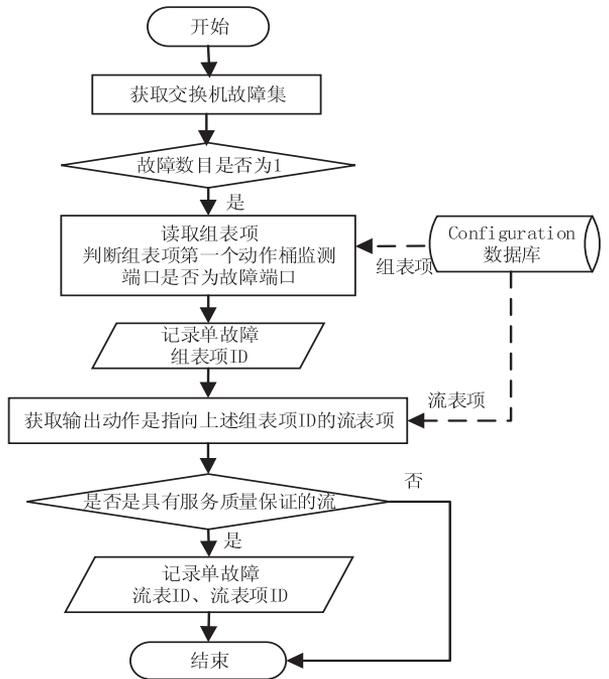


图 3 故障比较图

根据交换机故障端口集的数目判定是单故障还是多故障情形。当端口故障数目为 1 时,为单故障情形。首先从配置数据库中提取该交换机中的组表项,查找组表项中第一个动作桶监测端口为故障端口号的组表项,记录组表项 ID。然后对流表项进行遍历,找出输出动作作为上述组表项 ID 的流表项。最后提取流表项的 DSCP 匹配域自动来判别该流表项是否代表具有服务质量保证的流,调用方法 getIPMatch.getIpDscp() 获得 DSCP 域值,并与预设三种具有服务质量保证的业务值进行比较。若含有相同的,则采用审议式恢复模式;若都不相同,则采用主动式恢复模式。

当故障数目大于 1 时,为多故障情形。同样从配置数据库中查找并记录组表项两个动作桶的活性监测端口均属于故障端口集的组表项 ID。然后查找输出动作作为上述组表项 ID 的流表项,并将流表项 ID 传递给故障恢复模块进行被动式故障恢复。

3.3 故障恢复

主动式故障恢复是由交换机通过 Fast Failover 组表自动切换至备份路径,不需要故障恢复模块参与恢复,而审议式故障恢复和被动式故障恢复都需要故障管理系统为受故障影响的流重新计算一条路径,并下发流表项给新路径上的交换机。本节着重实现审议式和被动式的故障恢复,包括旧路径的删除、新路径的计算和下发。

首先基于 ics.uci.edu.jung 的开源 JUNG 包^[16] 构建 SDN 网拓扑图,通过查询 OpenDaylight 控制器 MD-SAL 数据库中的拓扑信息,并监听链路变更事件形成

实时更新的拓扑图。其次实现 Dijkstra 最短路径算法来计算网络拓扑图中交换机节点之间的最短路径作为最优路径。故障恢复模块首先提取出诊断模块输出的需要计算新路径的流表项匹配域中的源 IP 地址和目的 IP 地址,然后调用 Dijkstra 路由计算模块获取最短路径。具体的故障恢复过程如图 4 所示。

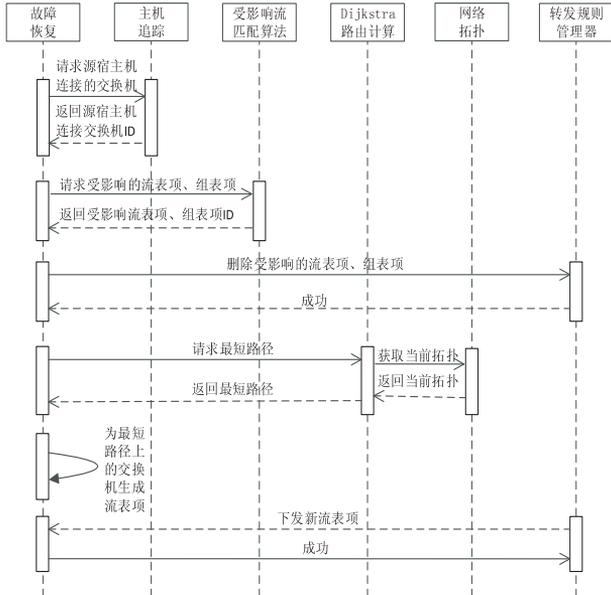


图 4 故障恢复序列图

(1) 根据流表项的源主机 IP 地址和目的主机 IP 地址,调用主机追踪 HostTracker 模块获取与主机相连的源交换机和目的交换机 ID。

(2) 通过源目的主机 IP 地址与 OpenDaylight 控制器 MD-SAL 数据库中的流表项进行匹配,获取受故障影响的旧路径上的流规则。

(3) 调用控制器的转发规则管理模块删除旧路径上的流规则。

(4) Dijkstra 路由计算模块根据实时更新的网络拓扑计算节点间的最短路径,调用 Dijkstra 路由计算模块获取指定源目的交换机节点的最短路径。

(5) 为最短路径上的交换机生成流表项,包括封装匹配域、指令集、优先级、生存时间等。

(6) 调用转发规则管理模块下发新路径上的流表项。

4 测试与分析

4.1 测试环境

采用两台普通 PC 机分别模拟 SDN 网络的数据层面网络和控制层面的控制器,两者之间通过一台路由器进行通信。

(1) 控制平面 PC: Ubuntu 12.04 系统, OpenDaylight 控制器 Helium 版本。

(2) 数据平面 PC: Ubuntu 12.04 系统, Mininet

2.2.0, OpenvSwitch 2.3.0, WireShark 抓包工具, Iperf 网络性能测试工具。

通过 Mininet 在数据平面 PC 上创建如图 5 所示的网络拓扑,由六台 OpenvSwitch 交换机和六台主机构成。源主机采用 Iperf 客户端模式以固定的时间间隔 T_{inv} 发送数据,目的主机采用 Iperf 服务器端模式接收数据。在发送数据的过程中模拟三种故障情形,并通过 Iperf 服务器端报告的丢包数 Num 计算故障恢复时间 $T = T_{inv} * Num$ 。

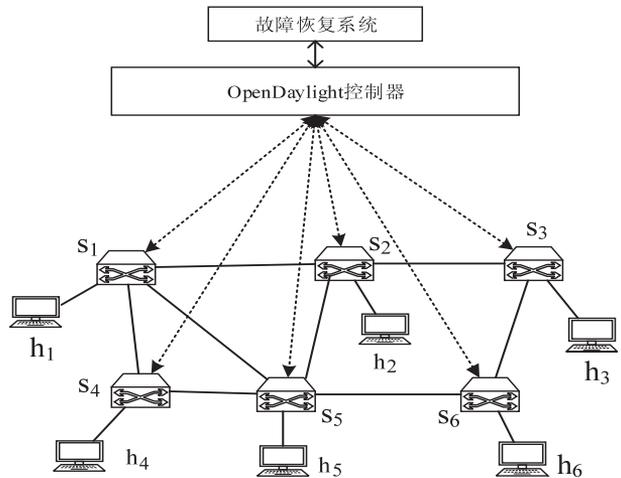


图 5 测试网络拓扑图

4.2 测试步骤与结果分析

(1) 利用 OpenDaylight 控制器的 RESTCONF 接口为网络的主机之间设置两条转发路径,例如为 h_1 和 h_3 下发主路径 $\langle s_1, s_2, s_3 \rangle$, 备份路径 $\langle s_1, s_5, s_6, s_3 \rangle$ 。

(2) 模拟单故障情形, Mininet 中输入命令 `link s1 s2 down` 模拟链路 $\langle s_1, s_2 \rangle$ 中断。使用 Iperf 从 h_1 向 h_3 发送数据,分别发送普通 UDP 数据分组和视频文件流。

(3) 模拟多故障情形,输入命令 `link s1 s2 down, link s1 s5 down` 模拟链路 $\langle s_1, s_2 \rangle$ 和 $\langle s_1, s_5 \rangle$ 中断。使用 Iperf 从 h_1 向 h_3 发送 UDP 数据分组。

通过观察 h_3 的 Iperf 服务器端输出信息以及使用 WireShark 抓包工具分析分组传递路径可知,在三种故障情形下主机 h_1 到 h_3 的数据分组均通过其他可用路径到达目的主机 h_3 。测试发现,系统能够准确地检测故障,并对故障情形进行诊断判别,最终系统能够采用最佳的恢复模式进行路由恢复。

在性能方面,分别针对三种故障情形进行 20 次模拟故障测试,证明系统具有很好的稳定性,具备长时间稳定运行的健壮性。

统计目的主机分组接收报告的丢包数来计算故障恢复时间,三种故障恢复模式的测试结果如图 6 所示。

从测试结果可以看出,利用交换机组表存储备份路径的主动式故障恢复时间大约为 6.75 ms,满足运营商网络 50 ms 的要求,这是因为主动式故障恢复不需

要与控制器交互,交换机直接切换至备份路径。对于单故障情形的审议式恢复模式,在主路径出现故障时,交换机会立即切换至备份路径,之后控制器的故障恢复系统会重新下发一条最优路径。其中切换至备份路径所耗时间与主动式相同,但之后系统为交换机下发新路径时也造成部分分组丢失,故障的平均恢复时间为 13.8 ms 左右,比主动式模式稍高,也满足运营商网络的要求,同时能为音视频等业务类型的流提供故障恢复期间的服务质量保证。

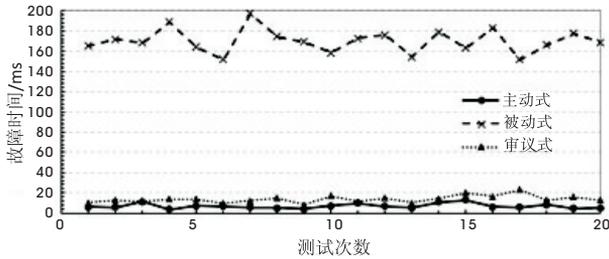


图6 故障恢复时间

在多故障情形下,利用控制器的被动式故障恢复时间大约为 170.5 ms。这是由于网络故障状态要传递给控制器,系统需要判断故障类型,并重新计算路径,再将流表项下发给交换机,所以故障恢复时间相对较长,不能满足运营商网络的要求。

未来应该对被动式恢复模式进行进一步的研究,以降低其故障恢复时间。

5 结束语

文中分析了 SDN 网络现有的两种故障恢复机制的不足,提出一种主动式和被动式相结合的故障恢复方案。采用异步告警和主动轮询两种方式检测 SDN 网络的链路和交换机节点故障,根据故障数目和流的业务属性对故障进行自动分类诊断,并设计了三种故障恢复模式,最后基于开源 OpenDaylight 控制器进行实现。

测试结果表明,该方案能够较好地甄别各类故障并自动采用预设的恢复模式进行故障恢复。

参考文献:

- [1] 雷葆华,王峰,王茜,等. SDN 核心技术剖析和实战指南[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [2] Open Networking Foundation. Software defined networking: the new norm for networks [EB/OL]. 2012. <https://www.opennetworking.org>.
- [3] 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.
- [4] 张顺森,邹复民. 软件定义网络研究综述[J]. 计算机应用研究,2013,30(8):2246-2251.
- [5] 张民贵,刘斌. IP 网络的快速故障恢复[J]. 电子学报,2008,36(8):1595-1602.
- [6] Open Networking Foundation. What is ONF? [EB/OL]. 2013. <https://www.opennetworking.org>.
- [7] McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks [J]. ACM SIGCOMM CCR,2008,38(2):69-74.
- [8] ONF. OpenFlow switch specification version 1.3.0 [EB/OL]. 2012. <https://www.opennetworking.org>.
- [9] Staessens D, Sharma S, Colle D, et al. Software defined networking: meeting carrier grade requirements [C]//Proc of 18th IEEE workshop on local & metropolitan area networks. [s.l.]:IEEE,2011:1-6.
- [10] Sharma S, Staessens D, Colle D, et al. Enabling fast failure recovery in OpenFlow networks [C]//Proc of 8th international workshop on DRCN. Krakow, Poland:IEEE,2011:164-171.
- [11] Sharma S, Staessens D, Colle D, et al. OpenFlow: meeting carrier-grade recovery requirements [J]. Computer Communications,2013,36(6):656-665.
- [12] Quality of service concept and architecture [EB/OL]. 2013. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23107.htm>.
- [13] OpenDaylight project [EB/OL]. 2014. <http://www.opendaylight.org/>.
- [14] 林昊,曾宪杰. OSGi 原理与最佳实践[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [15] Webber J, Parastatidis S, Robinson I. REST 实战[M]. 李锐,俞黎敏,马钧,等,译. 南京:东南大学出版社,2011.
- [16] 王水,马玉军. 网络/图应用开发通用基础架构 JUNG [J]. 电脑编程技巧与维护,2010(23):69-80.

一种SDN网络的故障自动恢复方案

作者: [洪硕果](#), [沈苏彬](#), [HONG Shuo-guo](#), [SHEN Su-bin](#)
作者单位: [洪硕果, HONG Shuo-guo\(南京邮电大学 物联网学院, 江苏 南京, 210003\)](#), [沈苏彬, SHEN Su-bin\(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京, 210003\)](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2015, 25(11)

引用本文格式: [洪硕果](#). [沈苏彬](#). [HONG Shuo-guo](#). [SHEN Su-bin](#) 一种SDN网络的故障自动恢复方案[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(11)