

软件定义卫星网络的链路故障检测和恢复方案

张 芳 邓畅霖 王 之 郭 薇

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘 要 针对具有星间链路的卫星网络,提出了一种软件定义卫星网络架构下的链路故障检测和恢复方案。首先基于软件定义卫星网络架构设计了一种主动上报式故障检测机制,并设计了链路故障检测算法,实现对卫星网络中链路故障的快速发现和准确定位。在此基础上,提出了一种保护加恢复式故障恢复机制来快速恢复因故障导致的业务中断。最后在原型系统中对该方案进行了验证。实验结果表明,该方案可以在毫秒级的时间内快速检测并准确定位到链路故障,并可以在 $10\pm 2\text{ms}$ 的时间内对故障进行快速恢复。同时,该方案可适用于多种卫星网络拓扑。

关键词 软件定义卫星网络,软件定义网络,链路故障检测,链路故障恢复

中图分类号 V19 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.010

Link Failure Detection and Fast Recovery in Software-defined Satellite Network

ZHANG Fang DENG Chang-lin WANG Zhi GUO Wei

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Link failure detection is an open issue remained to be solved in satellite network with inter-satellite links. This paper proposed a novel strategy of link failure detection and network service recovery based on software-defined satellite network(SDSN) architecture. In this architecture, the link failure detection mechanism is designed to detect and locate link failures in satellite network, while the failure recovery mechanism combines both protection and restoration to migrate and recover the interrupted services. To prove the efficiency of the proposed strategy, we conducted an experiment on a prototype system. The results show that the link failures can be fast located, and the recovery durations are kept in 10 ± 2 milliseconds. The architecture and corresponding strategy can be adapted to any other satellite network topology.

Keywords Software-defined satellite network(SDSN), Software-defined network, Link failure detection, Link failure recovery

1 引言

随着卫星上技术(星间链路、星上交换技术等)的发展,越来越多的卫星星座开始引入星间链路,例如铱星、GPS III、北斗等。星间链路的加入大大提高了卫星网络通信的灵活性,但同时也增加了一些非预测性星间链路故障(由空间环境导致或者由卫星设备故障引发的链路故障)的发生率。因此,网络链路故障的实时检测与快速恢复对提高卫星网络的可靠性和保证高质量的卫星通信服务是至关重要的。本文针对具有星间链路和星上交换能力的卫星网络展开研究。

传统的卫星系统中,星上故障由地面测控站^[1]进行检测。随着卫星网络的复杂化,专家系统^[2-3]技术被提出并应用到测控站对卫星的故障管理中,但这类故障检测方案需要依赖先验知识,缺乏通用性,且一定程度上需要人工参与,无法保证对星上故障进行实时检测。为了提高卫星故障检测的实时性,星上分布式故障管理方案^[4]被提出。文献[5]提出了一种

基于专家系统的分布式星上故障管理方案,但这种方案对星上管理节点的存储和运算资源都会造成较大的压力。文献[6]提出了一种基于动态路由策略的链路故障检测算法,将地面通信网络中基于贝叶斯理论的链路故障检测方案^[7]应用到卫星中。文献[8]对这种算法进行了改进以进一步提高故障检测的准确性并降低通信开销,但是这类方法是由管理节点周期性地向全网发送探测包来发现链路故障,所以故障发现的时间依赖于探测包发送的时间周期和网络规模的大小,且全网分发探测包也会造成较大的通信开销。随着软件定义网络(SDN)^[9]的提出,软件定义网络和 OpenFlow^[10]技术被广泛应用于地面通信网来实现网络状态监测和网络故障的恢复,这类方案在网络状态监测和故障恢复的实时性上具有显著优势,但是如何将它应用于高动态、高时延的卫星网络中来检测并恢复星间链路故障还有待研究。

为了进一步解决星间链路故障的实时检测和快速恢复问题,本文提出了一种软件定义卫星网络架构下的链路故障检

到稿日期:2016-05-10 返修日期:2016-07-23

张 芳(1991—),女,硕士生,主要研究领域为卫星网络、卫星路由技术、软件定义网络,E-mail: zhang.fang@sjtu.edu.cn;邓畅霖 男,博士生,主要研究领域为卫星网络、软件定义网络;王 之 男,硕士生,主要研究领域为卫星网络;郭 薇(1963—),教授,博士生导师,主要研究领域为网络管理、光网络技术、软件定义网络、卫星通信网,E-mail: wguo@sjtu.edu.cn.

测和恢复方案。文章首先设计了一种低开销的链路故障检测方案,该方案利用主动上报式故障检测机制将故障发现时延降低到毫秒级,同时设计了链路故障检测算法来实现对故障的准确定位。之后提出了一种保护加恢复的故障恢复方案,同时保证了故障业务恢复时间的电信级要求(小于 50ms)和故障恢复后端到端的时延最优。本文第 2 节介绍了软件定义卫星网络架构,并在这种架构下设计了一种主动上报式故障检测方法和链路故障检测算法;第 3 节介绍了保护加恢复的故障恢复机制;第 4 节搭建了实验原型系统,验证了对不同类型的卫星网络链路故障的快速检测和恢复,并从故障检测时间、故障恢复时间和恢复路径的端到端时延方面评价了整个方案的性能。实验结果证明了本文提出的软件定义卫星网络链路故障检测和快速恢复方案的可行性和优越性。

2 基于软件定义卫星网络架构的链路故障检测

2.1 软件定义卫星网络架构

类似 SDN 三层模型^[11],常见的软件定义卫星网络架构^[12-13]一般分为 3 层:应用层、控制层和网络设备层,如图 1 所示。

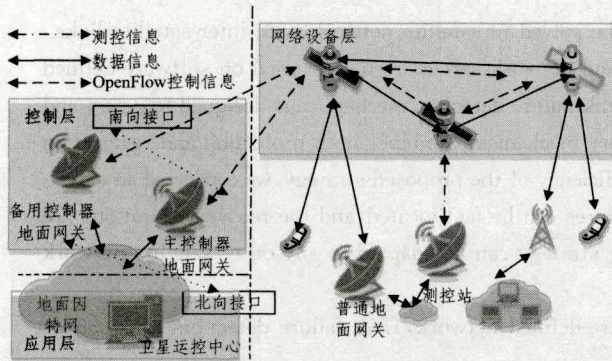


图1 软件定义卫星网络架构

其中卫星运控中心处于应用层,除了传统的功能外,还可以根据需求部署不同的应用如拓扑展示等,这些应用可以通过控制器提供的北向接口调度整个卫星系统资源;控制层包

括控制器地面网关,控制器地面网关上安装有 SDN 控制器,通过南向 OpenFlow 接口收集全局网络状态,并下发流表指导网络设备层转发数据;网络设备层包括多个卫星节点,卫星节点只具有简单的数据转发功能,通过匹配控制器下发的流表来转发数据,所有卫星通过带内方式接受地面站控制。

2.2 链路故障检测方案的设计

卫星网络中的链路故障可能是由于空间环境造成的链路中断,也可能是卫星节点端口失效引起的链路中断。在软件定义卫星网络的架构下,这类故障可以通过 3 种方式来监测:1)主动上报式,是由链路或端口状态发生改变的卫星上报 ofp_port_status 消息给控制器,消息结构如图 2 所示,其中 state 字段有 4 种类型的值分别对应端口的 4 种状态,0 值表示端口对应的链路中断;2)周期查询式,是由控制器周期性发送 request 类型的 ofmp_port_description 消息给每个卫星节点,同样通过查询 reply 消息中的 state 字段值来获取当前端口的链路状态;3)周期发现式,由控制器周期性发送封装有 LLDP 报文的消息给所有卫星节点,消息转发给所有相邻卫星节点后发回到控制器,控制器通过解析消息中携带的源节点和目的节点信息来获取或者更新链路状态。

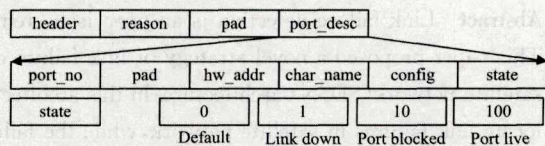


图2 ofp_port_status 消息结构

3 种方式中,第一种机制可以及时上报网络中的链路故障给控制器,并且只产生很小的通信开销。第二种和第三种机制中故障检测时间受限于控制器发送 request 消息或 LLDP 消息的周期长度,并且会产生较大的通信开销。考虑到卫星网络中对链路故障检测的实时性要求和开销限制,本文设计了以主动上报式为基础的链路故障检测和定位机制,方案中使用的控制器为开源控制器 RYU^[14]。以图 3 为例进行说明。

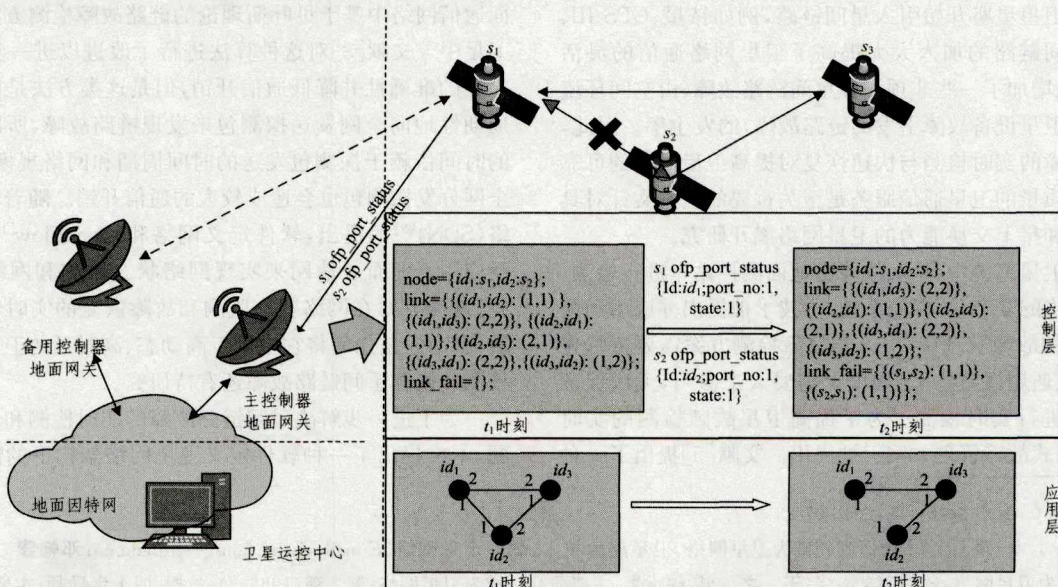


图3 软件定义卫星网络链路故障监测流程图

(1)初始化。链路故障检测模块通过控制器提供的 get_switch , $\text{get_linkAPI}^{[15]}$ 分别获取网络节点信息和网络链路信息,然后结合星历图初始化卫星节点映射表 node 、链路表 link 和故障链路表 link_fail 。其中, node 表中初始化了数据平面的卫星节点和控制平面对节点虚拟化之后生成 ID 的对应关系,链路表中初始化了网络中链路对应的节点 ID 和端口的映射关系, link_fail 表中初始化了故障链路信息。在图 3 所示的拓扑下,它们分别为: $\text{node}: \{id_1: s_1, id_2: s_2, id_3: s_3\}$; $\text{link}: \{(id_1, id_2): (1, 1)\}, \{(id_1, id_3): (2, 2)\}, \{(id_2, id_1): (1, 1)\}, \{(id_2, id_3): (2, 1)\}, \{(id_3, id_1): (2, 2)\}, \{(id_3, id_2): (1, 2)\}$; $\text{link_fail}: \{\}$ 。

(2)当有星间链路状态发生改变时,触发链路状态改变的卫星节点向控制器发送 ofp_port_status 消息。图 3 中,当链路 (s_1, s_2) 中断时,卫星节点 s_1 的 1 端口和卫星节点 s_2 的 1 端口所对应的链路状态改变,此时, s_1 和 s_2 各自上报 ofp_port_status 消息给控制器。

(3)控制器接收到 ofp_port_status 消息后,链路故障检测模块通过链路故障检测算法定位出故障的链路和端口以及发生链路故障的卫星。在图 3 中,控制器检测并定位到 link_fail 为 $\{(s_1, s_2): (1, 1)\}, \{(s_2, s_1): (1, 1)\}$ 。应用层通过北向接口获取到最新网络拓扑。

从网络中发生链路故障到控制器监测到故障的时间 $T_{\text{detect}} = T_{\text{delay}} + T_{\text{query}}$, 其中 T_{delay} 为消息上报到控制器所需要的延时, T_{query} 是控制器对消息的解析以定位故障的延时。这种机制可以使卫星网络中的故障检测延时 T_{detect} 降低到几毫秒至几百毫秒。

算法 1 链路故障检测算法

```

1. init satellite, link, link_fail
2. if ofp_port_statusmsg arrive then
3. id=dpid in msg, port_num=port_no in msg, state=state in msg
4.   if state==1 then
5.     link_new←get_link(controller API)
6.     link_down←link-link_new
7.     link=link_new
8.     for each(src,dst) in link_down
9.       s_src=satellite[src]
10.      s_dst=satellite[dst]
11.      link_fail[(s_src, s_dst)]=link_down(s_src, s_dst)
12.   else
13.     link←get_link(controller API)
14.   end if
15. end if

```

3 基于软件定义卫星网络架构的链路故障恢复

3.1 故障恢复方案的设计

目前软件定义网络中对于网络故障的恢复主要分为两种,即控制器恢复式^[16]和路径保护式^[17]。控制器恢复式的基本思路是在故障发生后,控制器重新计算并安装新的路径来恢复中断业务。路径保护式的基本思路是为每一条业务流预先配置好保护路径,主路径故障时,用保护路径对中断业务进行恢复。

由于卫星网络具有传播时延长的特点,单独的恢复式或保护式方案都无法保证良好的故障恢复性能。只采用恢复式方案时,若在故障信息上报以及新的流表安装的这段时间内业务流中断,整个故障恢复时间将长达几十毫秒到几百毫秒,这是用户无法接受的。只采用保护式方案时,由于备用路径预先安装,往往不具有最优性,在传播时延比较长的卫星网络中,这种非最优路径的选择会导致恢复后有的业务端到端时延增加明显;同时,单纯的保护式方案还会有保护路径同时失效的风险,但是由于这种情况在卫星网络中的概率较低,本文不过多讨论。为了解决这两种故障恢复方案在卫星网络中存在的问题,本文结合两种方案的优势,设计了保护加恢复式的故障恢复方案。该方案的基本思路是为所有业务预装保护路径,在主路径故障后先由保护路径恢复业务,当控制器安装好新的最优路径后再将业务迁移。相比于恢复式方案,此方案可以大大缩短故障恢复时间;相比于保护式方案,此方案可以大大减小故障恢复后的端到端时延。

该方案的设计如图 4 所示。本文在控制器中实现了路由计算模块、拓扑管理模块、链路故障检测模块、业务管理模块和流规则管理模块。其中拓扑管理模块负责通过控制器提供的 get_switch 和 get_linkAPI 接口来实时获取底层网络拓扑;路由计算模块负责计算两条不相交的主备路径,以降低主、备路径同时故障的可能性,过程是首先用 dijkstra 算法为每条业务流计算出最优主路径,然后在网络拓扑中将主路径中的链路权值置为无穷大,再用 dijkstra 算法计算一条备用路径;链路故障检测模块负责定位故障链路;业务管理模块负责保存所有业务流的主备路由信息;流规则管理模块根据路由计算结果生成流表。首先,当新业务流到来时,控制器根据当前网络的最新拓扑情况为业务流计算主备路由。当网络中发生链路故障时,卫星上报 ofp_port_status 消息给控制器,拓扑管理模块重新获取更新拓扑,链路故障检测模块定位故障链路,故障业务查询模块根据故障链路查询受影响的业务,路由计算模块为故障业务计算主备路径同时返回失效路径,流规则管理模块根据路由计算模块的计算结果生成表项并下发给卫星。

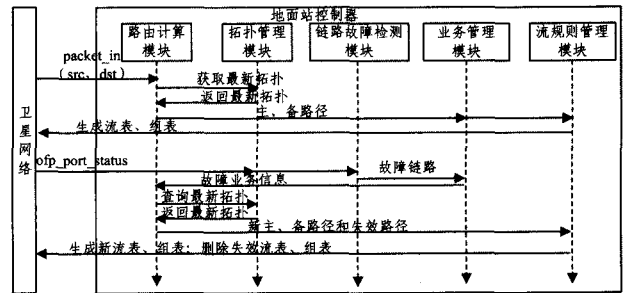


图 4 软件定义卫星网络保护式加恢复式故障恢复方案

3.2 故障恢复流程

根据所设计的故障恢复方案,故障后中断业务的恢复流程分为两个步骤:1)利用 Fast Failover 组表将中断业务通过备用路径恢复连通;2)在控制器下发新的主备路径流表后将业务迁移。

具体流程通过图 5 和图 6 进行说明。对于从用户 u_1 到

u_2 的这条业务流,故障前的主路径为 $\langle s_1, s_4, s_5 \rangle$,备用路径为 $\langle s_1, s_2, s_3, s_5 \rangle$ 。其中, s_1 和 s_4 安装了 Fast Failover 类型的组表,此类型的组表可通过监测本设备端口的状态来决定数据包的转发行为。组表中包含一系列的组表项,每一条组表项都可以关联一个端口状态,设备可以将数据包从第一个没有失效的端口转发出去。第一步,当星间链路 $\langle s_1, s_4 \rangle$ 故障时, s_1 的组表中和端口 3 关联的转发项失效,数据将会根据和端口 2 关联的转发项进行转发,业务通过备用路径 $\langle s_1, s_2, s_3, s_5 \rangle$ 恢复。第二步,如图 6 所示,控制器根据最新网络拓扑为中断业务计算最优恢复路径和备用路径(图中未画出)并下发给卫星节点,卫星节点中的流表和组表更新后,业务被重新迁移到路径 $\langle s_1, s_2, s_4, s_5 \rangle$ 。

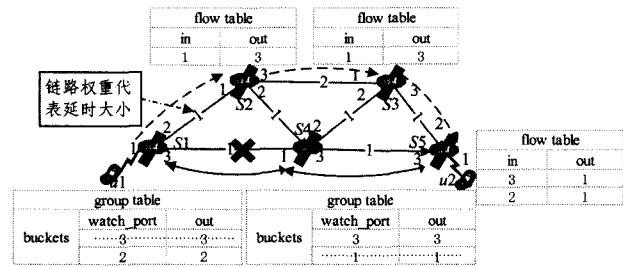


图 5 业务通过保护路径快速恢复

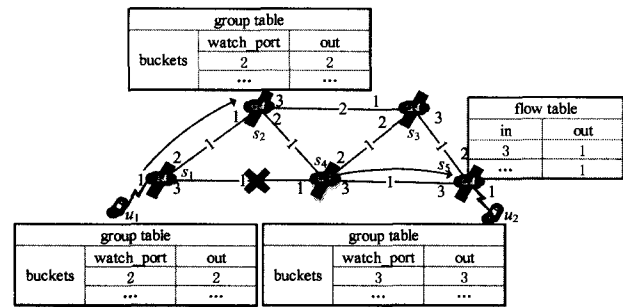


图 6 业务重新迁移到最佳路径

4 原型系统搭建与实验

为了验证文中提出的软件定义卫星网络的链路故障检测和恢复方案,分别在具有环形拓扑的 GEO 卫星星座和具有曼哈顿拓扑的铱星星座中进行了实验。实验首先验证了星间链路故障的快速检测和定位;然后从链路故障恢复时间和链路的端到端时延两个方面来评价了恢复式、保护式和本文提出

的恢复加保护式这 3 种故障恢复方案的性能;最后定性对比了本文提出的链路故障检测方案和传统的故障管理方案。

4.1 原型系统搭建

根据提出的软件定义卫星网络架构,本文搭建了实验原型系统,其中网络设备层的卫星节点由 ovs^[18]来模拟,卫星用户用虚拟主机来模拟,二者都是由运行在服务器中的 Mininet^[19]来生成;控制层的地面控制站由 SDN 控制器(RYU)来模拟;应用层的运控中心由主机来模拟。具体实验台搭建如图 7 所示。

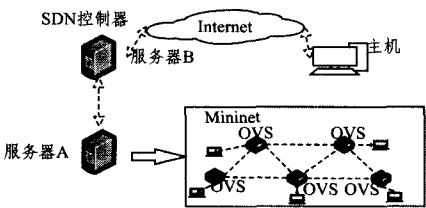


图 7 实验平台

实验中 GEO 星座拓扑和铱星星座拓扑是根据它们的星座参数(见表 1)在 STK 中仿真生成,然后在服务器 A 中创建相同拓扑参数(连接关系、链路时延)的网络,以此来模拟网络设备层;链路中断和端口故障引起的链路故障是用 Mininet 的 link down 指令和 ovs 的 ifconfig down 指令模拟;实验中的业务流由虚拟主机中安装的 iperf 收发包工具来产生;故障恢复时间和网络丢包情况则是通过 wireshark 抓包工具和 iperf 来分析。

表 1 星座参数

参数类型	LEO(铱星)	GEO
卫星个数	66	3
轨道数目	6	1
轨道高度/km	781	35800
轨道倾角/°	86.4	0
轨道周期	100.13min	24h
星间链路条数	4	2

4.2 实验结果分析

首先评价了本文提出的星间链路故障检测方案的性能,从故障检测时间和故障检测精确度两个指标来进行衡量。图 8 示出了铱星星座中不同卫星节点发生链路故障时控制器检测到故障的时间,从中可知,故障检测的平均时间为 65.1ms,其中最大为 118.1ms,最小为 3.2ms。

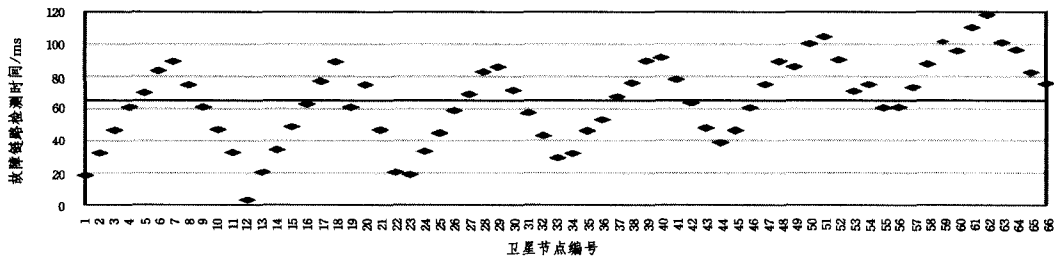


图 8 铱星星座中不同卫星节点发生链路故障的检测时间

对于故障恢复方案的性能,用链路故障恢复时间和端到端时延两个指标来进行衡量。实验对比了恢复式、保护式和恢复加保护式 3 种恢复方案的性能。

在 GEO 网络拓扑和铱星网络拓扑中分别测量了 3 种链

路故障恢复方案的故障恢复时间。实验方案为在网络中随机选取两个虚拟主机(用户),从一方向另一方发送 udp 数据包,速率为每毫秒发送一个,根据丢包个数来计算故障恢复时间,实验样本为 50 个。图 9 示出 GEO 星座拓扑中 3 种故障恢复

方案下的故障恢复时间,由图可知恢复式方案的平均故障恢复时间为 547ms,其中最大值为 810ms,最小值为 400ms;保护式和保护式加恢复式的故障恢复时间基本相等,均值分别为 9.8ms 和 9.4ms。

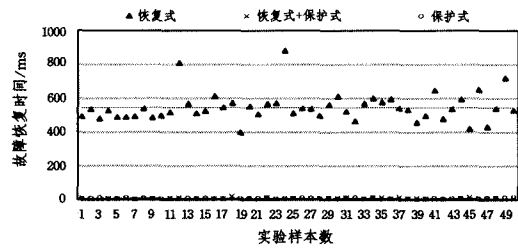


图 9 GEO 星座拓扑中 3 种恢复方案下的链路故障恢复时间

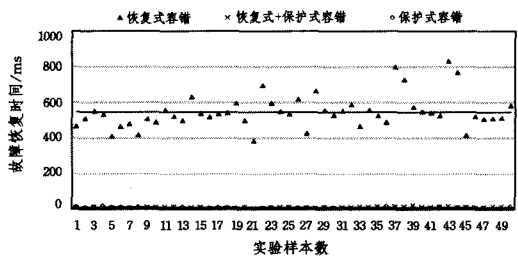


图 10 铱星星座中 3 种恢复方案下的链路故障恢复时间

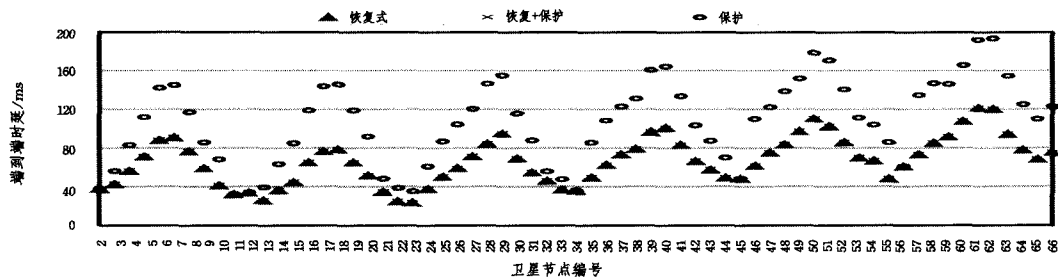


图 11 铱星星座中 3 种恢复方案下卫星节点 1 到其余卫星节点故障恢复后的端到端时延

表 2 定性对比了传统的卫星故障检测方案和本文提出的基于软件定义卫星网络的链路故障检测和恢复方案在故障检测时间、星上存储/计算开销、通信开销和故障恢复时间方面的优劣性。由表 2 可知,基于地面站测控的卫星故障检测方案的实时性最差,这是由于地面站测控需要卫星旋转到测控站上空才可以接收和发送测控信息,因此故障检测时间会达到分钟或者小时甚至是天的级别。地面站测控属于一种集中式的故障管理方式,不需要星上存储和计算开销,测控的通信开销也较小。基于星上分布式的卫星故障管理方案实时性一般,由于星上管理节点需要周期性轮询全网状态或周期性地分发探测包来进行故障检测,因此这种方案的故障检测时间依赖于周期的大小,一般为秒或分钟的级别。在这种分布式方案下管理节点需要存储多条探测结果并依此计算出故障检测结果,这会对星上存储和计算造成较大的负担,而周期性地轮询或探测也会带来较大的通信开销。目前基于地面站测控和星上分布式故障检测方案的研究主要针对故障检测,对于链路故障恢复没有进行更深的探讨。而本文提出的基于软件定义卫星网络(SDSN)的链路故障检测和恢复方案的故障检测时间为毫秒级,此方案属于集中式的故障管理,不需要星上的存储和计算开销,并且基于主动上报的故障检测方式带来

的通信开销也很小,同时我们提出了一种链路故障恢复方案,该方案可以在电信级标准(小于 50ms)内恢复故障业务。由此可见,本文提出的链路故障检测和恢复方案在实时性上具有明显的优势。

表 2 3 种链路故障检测方案的对比				
方案名称	故障检测时间	星上存储/计算开销	通信开销	链路故障恢复时间
地面站测控	分钟/小时	无	小	—
星上分布式	秒/分钟	大	大	—
SDSN	毫秒	无	小	小于 50ms

结束语 为了解决卫星网络中链路故障检测和恢复的问题,本文提出了一种软件定义卫星网络架构下的链路故障检测和恢复方法;设计了基于主动上报的链路故障发现和定位方案,此方案可以在毫秒级的时间内对链路故障进行准确的发现和定位;同时还设计了一种保护加恢复的链路故障恢复方案,此方案可以在 $10\pm2\text{ms}$ 的时间内对故障进行恢复,且保证了故障恢复后具有最小的端到端时延。最后搭建了实验原型系统,验证了文中提出的基于软件定义卫星网络的链路故障检测和恢复方案的可行性及优越性。

(下转第 101 页)

- User Priorities in Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7374-7388.
- [12] YANG S N, KE C H, LIU Y B, et al. Mobility management through access network discovery and selection function for load balancing and power saving in software-defined networking environment[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2016, 9: 1687-1499.
- [13] FAHIMI M, GHASEMI A. Joint spectrum load balancing and handoff management in cognitive radio networks; a non-cooperative game approach [J]. Wireless Networks, 2016, 22(4): 1161-1180.
- [14] HAN T, ANSARI N. A Traffic Load Balancing Framework for Software-Defined Radio Access Networks Powered by Hybrid Energy Sources[J]. Transactions on Networking, 2016, 24(2): 1038-1051.
- [15] LIU S M, MENG Q M, PAN S, et al. A Simple Additive Weighing Vertical Handoff Algorithm Based on SINR and AHP for Heterogeneous Wireless Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1): 235-239. (in Chinese)
刘胜美, 孟庆民, 潘苏, 等. 异构无线网络中基于 SINR 和层次分析法的 SAW 垂直切换算法研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 235-239.

(上接第 67 页)

参考文献

- [1] ZHAO Y F. Development in Satellite TT&C Network[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2002, 21(3): 1-4. (in Chinese).
赵业福. 卫星测控网的技术发展[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(3): 1-4.
- [2] 杨维垣, 张培志. 航天专家系统需求、现状、特点和发展战略的初步研究[J]. 航天器工程, 1993(1): 11-19.
- [3] 周训文. 人工智能及其专家系统在航空航天测控中应用[J]. 测控技术, 1991(3): 10-13.
- [4] LI H, YANG X H, LI H B. Study on Distributed Hierarchical Fault Management Paradigm of Satellite Network[J]. Journal of Chinese Computer System, 2009, 30(7): 1341-1345. (in Chinese)
李航, 杨雪华, 李鸿彬. 卫星网络的分布式层次故障管理模式研究[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(7): 1341-1345.
- [5] WEN Y Y, ZHAO J L, WANG G X. A Network Management System Applying to Integrated Satellite Information Network [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(2): 231-235. (in Chinese)
闻英友, 赵建立, 王光兴. 一种面向卫星综合信息网的网络管理系统[J]. 兵工学报, 2005, 26(2): 231-235.
- [6] ZHAO Z G, GONG C Q, WANG G X. Identification of Dynamic Routing-Based Faulty Links in LEO/MEO Satellite Communication Networks[J]. Mini-Micro System, 2005, 26(6): 916-919. (in Chinese)
赵志刚, 拱长青, 王光兴. LEO/MEO 卫星网络基于动态路由策略的链路故障检测[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(6): 916-919.
- [7] WANG R Y, WU Q, XIONG Y, et al. Link failure localization algorithm based on Bayesian symptom explained degree[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(3): 712-714. (in Chinese)
王汝言, 吴晴, 熊余, 等. 基于贝叶斯征兆解释度的链路故障定位算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(3): 712-714.
- [8] ZHANG X J, WANG Z L. Autonomous identification based on correlation of faulty links for satellite communication networks [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2014(3): 10-13. (in Chinese)
张小娟, 王祖林. 基于关联性的卫星通信网链路故障自主识别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014(3): 10-13.
- [9] ZHANG C K, CUI Y, TANG H Y, et al. State-of-the-Art Survey on Software-Defined Networking (SDN) [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 62-81. (in Chinese)
张朝昆, 崔勇, 唐嵩祎, 等. 软件定义网络 (SDN) 研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 62-81.
- [10] 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.
- [11] COMMITTEE O, et al. Software-defined networking: The new norm for networks[R]. Open Networking Foundation, 2012.
- [12] TANG Z, ZHAO B, YU W, et al. Software defined satellite networks: Benefits and challenges [C] // Computing, Communications and IT Applications Conference (ComComAp), 2014 IEEE. IEEE, 2014: 127-132.
- [13] GOPAL R, RAVISHANKAR C. Software defined satellite networks[C] // 32 nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), 2014.
- [14] RYU H. Welcome to RYU the Network Operating System (NOS) [EB/OL]. <http://ryu.readthedocs.org/>
- [15] <https://github.com/osrg/ryu/blob/master/ryu/topology/api.py>.
- [16] HOU L, WANG S, LIN Y K, et al. Link Failure Recovery Based on SDN[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(6): 18-23. (in Chinese)
侯乐, 汪硕, 林毅凯, 等. 基于 SDN 的链路故障恢复[J]. 电信科学, 2015, 31(6): 18-23.
- [17] SGAMBELLURI A, GIORGETTI A, CUGINI F, et al. Effective flow protection in open-flow rings [C] // National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2013: JTh 2A. 01
- [18] Open vSwitch Homepage [EB/OL]. <http://openvswitch.org/>
- [19] LANTZ B, HELLER B, MCKEOWN N. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks [C] // Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM, 2010: 19.
- [20] VAN ADRICHEM N L M, VAN ASTEN B J, KUIPERS F A. Fast recovery in software-defined networks [C] // 2014 Third European Workshop on Software Defined Networks. IEEE, 2014: 61-66.