



研究与开发

一种基于 SDN 的移动自组织网络服务路径重建算法

董芳, 李鸥, 莫有权

(信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对基于 SDN 的移动自组织网络链路故障时的服务路径重建问题, 提出一种服务路径分级重建方法, 通过备份重建和计算重建相结合的过程提高了服务路径重建的时效性; 同时, 考虑服务路径重建可能引发的路径冲突问题, 从图论的基本原理出发, 给出了完备的判定重建定理, 在快速重建的基础上亦保证重建服务路径的有效性。

关键词: 移动自组织网络; 软件定义网络; 服务路径; 路径重建

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018263

A reconstruction algorithm of service path for mobile Ad Hoc network based on SDN

DONG Fang, LI Ou, MO Youquan

School of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: In view of the service path reconstruction for link failure in the mobile Ad Hoc network based on SDN, a hierarchical service path reconstruction method was proposed. The timeliness of service path reconstruction was improved through the combination of reconstruction on backup and calculation. At the same time, considering the possible path conflict caused by the service path reconstruction, the criterion of comprehensive determinant reconstruction was given based on the graph theory, and it also ensured the effectiveness of reconstruction service path.

Key words: mobile Ad Hoc network, software defined networking, service path, path reconstruction

1 引言

移动自组织网络 (mobile Ad Hoc network, MANET) 是由若干移动节点组成的、通过节点间互相协作和多跳转发进行通信的网络系统, 具有无基础设施支持、灵活自适应组网、无中心分布

式控制等特点。MANET 既有效解决了无固定通信基础设施条件下移动通信联络需求, 又可作为现有固定通信基础设施的延伸来实现广域通信覆盖^[1], 近年来已在军事通信、医疗卫生、智能家居、城市交通、灾害救助、科学探险等领域取得了广泛应用。

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601516)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61601516)



随着应用规模的拓展,传统 MANET 的网络结构和组织方式受到带宽优化、功率控制、节点移动性等因素的限制,网络性能的稳定性和上层应用的使用效率也受到严重影响。在此背景下,网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)和软件定义网络(software defined networking, SDN)技术开始在移动自组织网络中得到应用,其通过在移动自组织网络中建立灵活可编程的数据转发机制、网络功能动态部署机制和全局一致的协同控制机制等,可实现全局范围内的网络性能优化和高效管理控制,显著增强移动自组织网络在服务路由选择、网络资源管理及规模化组网等方面的能力^[2]。

面对移动自组织网络拓扑结构动态变化、信道容量有限且不确定、节点移动不可预测等特性,如何在链路故障、信号中断等网络环境变化时快速重建服务路径,是当前基于 SDN 的移动自组织网络亟待解决的问题。在服务路径冲突避免与恢复策略方面,美国斯坦福大学网络系统研究小组提出了一种可编程无线网络数据平面 OpenRadio^[3],该结构将无线网络分成处理平面(即数据层)和决策平面(即控制层),并提供了贯穿整个无线网络协议栈的统一开放可编程接口,运营商通过 OpenRadio 仅需编写相应的数据转发规则即可实现高效灵活的数据转发控制,降低了异构无线网络的配置复杂度;Son 等人^[4]提出了一种模块化的控制器解决方案,在保障 OpenFlow 动态流策略一致性的同时,扩展控制器功能,监测规则冲突,杜绝恶意修改;Andrew 等^[5]提出了一种工程级方案,通过多级流表实现分层策略的技术,用以提升策略冲突的解决效率,同时保障全网流规则的策略一致性。上述研究从多级流表或者规则更新等角度进行服务路径重建,当通过多个控制域内设备连接构成一条多跳传输路径时,控制器对物理链路故障的恢复无法满足承载要求。

另外,策略更新是避免策略错误的必要过程。Reitblatt 等^[6]设计了分阶段配置的方案,利用 OpenFlow 的网络标记更新功能将实际改变的安全策略实时迁移到新的逻辑控制层上,保证了逻辑控制的一致性。为实现服务路径的快速恢复并减少控制器的开销,Stephens 等人^[7]提出了一种数据平面快速恢复机制,在故障发生时由交换机执行第一个有效活动端口上的指令集,可实现快速的局部路由恢复。针对服务路径失效与重建的时延限制,FlowTags 通过中间件(Middlebox)为数据分组增加标签,解决了服务路径中的源绑定问题以及服务路径失效的环路问题^[8];参考文献[9]提出了一种基于路径观察的物理路由协议 POPR,综合考虑相对距离、方向和业务密度等参数进行服务路径的选择,从而改善了交叉口和交叉口之间的物理转发;参考文献[10]提出了一种基于压缩感知的无线传感器网络路径重构方法,通过将稀疏路径表示成编码分组,然后使用压缩传感技术从少量的数据分组中恢复路径矢量,从而使得每个分组路径重构能够准确且高效,且不受网络动态和有损链路的影响。然而,为了处理高移动性和环境障碍,大多数物理路由协议在分组传输期间不考虑稳定链路,这导致网络服务路径的时延和分组丢失率较高。同时,流表下发前控制器未对规则互斥性进行检查,无法有效避免服务路径逻辑冲突。

针对上述问题,本文提出了一种服务路径分级重建方法,该方法通过备份重建和计算重建两阶段过程提高了服务路径重建的时效性;同时,考虑服务路径重建后引发的路径冲突问题,从图论角度给出了完备的重建判定定理,同时兼顾了服务路径重建的快速性和有效性。

2 服务路径重建问题

节点移动性是 MANET 的天然优势,而与之伴随的信道不确定性却是 MANET 服务质量欠佳的主要诱因,集中体现在由物理链路故障引起的

控制器内或控制器之间服务路径中断和冲突, 所以, 快速、有效重建服务路径是 MANET 不可回避的重要问题。

2.1 定义

为便于描述和解决问题, 本文将在满足用户需求情况下快速有效恢复故障服务路径的问题, 称为服务路径重建问题, 并给出以下相关定义。

定义 1 服务请求 (service request, SR): 依据用户需求在网络中部署的由源节点到目的节点的服务构建请求。SR 实例化为 $SP_n = \langle SN_n, Req_n, DN_n \rangle$, SN_n 表示源节点, DN_n 表示目的节点, Req_n 表示用户需求。

定义 2 服务关键点 (service key node, SKN): 保证 SR 部署必须经过的网络节点。

定义 3 服务路径 (service path, SP): 承载 SR 的路径, 由控制器依据 SP 所需求的服务构建的 SKN 节点顺序序列, 表示为 $SP_k = \{SKN_1, SKN_2, \dots, SKN_j, \dots, SKN_n \mid \forall SKN_1, \dots, SKN_j \in N_1 \dots \forall SKN_{j+1}, \dots, SKN_n \in N_i\}$, N_i 为受第 i 个控制器控制的节点集合。若 SP_k 是满足 $SP_n = \langle SN_n, Req_n, DN_n \rangle$ 的一条服务路径, 则:

- 节点 SKN_j 和 SKN_{j+1} 相互连通, $1 \leq j \leq n-1$;
- SKN_j 和 SKN_{j+1} 间可以存在中间节点 v_m , 此时 SP 可表示为:

$$SP_k = \{SKN_1, SKN_2, \dots, v_1 \dots, SKN_j, \dots, v_m \dots, SKN_n \mid \forall SKN_1, \dots, SKN_j \in N_1 \dots \forall SKN_{j+1}, \dots, SKN_n \in N_i\}$$

- $SKN_1 = SN_k$, $SKN_n = DN_k$;
- 当 I 为 SP_i 上 SKN 节点的集合, $I \supseteq Seq_k$, 即可以满足 SR。

定义 4 原子路径 (atom path, AP) 为 SP 上任意两个相邻节点构成的路径, 用 $\{AP_{j,j+1} = (SKN_j, SKN_{j+1}) \mid SKN_j, SKN_{j+1} \in SP\}$ 表示。两个不同的原子路径对应的物理链路可以是相同的。如 $SP = SKN_1-SKN_2-SKN_4-SKN_3-SKN_6$, 原子路径 $AP_{23} = SKN_2-SKN_4$, $AP_{45} = SKN_2-SKN_4$, 对应相同

的物理链路 SKN_2-SKN_4 。

定义 5 重建服务路径 (rebuilt service path, ReSP) 即当 SP 冲突时, 控制器根据 SR 计算的一条或多条新路径。当 $ReSP_j$ 是 SP_i 的一条重建路径时, 满足:

- SP 的定义;
- $ReSP_j$ 源节点和目的节点与 SP_i 相同;
- 若 I 、 ReI 分别为 SP_i 、 $ReSP_j$ 上 SKN 节点的集合, 则 $I \supseteq ReI$, $ReSP_j$ 提供的服务及 SKN 顺序与 SP_i 相同。

2.2 问题描述

在基于 SDN 的移动自组织网络中, NFV/SDN 将传统网络设备各自运行的控制与转发逻辑转化为控制与数据平面之间连接的虚拟化。美国斯坦福大学^[11]提出的 OpenFlow+FlowVisor 网络切片方案是目前 NFV/SDN 的主流形式。FlowVisor 作为网络虚拟化的转化部件, 部署在普通控制器和交换机之间, 实现将物理网络划分为多个逻辑网络切片, 并根据网络切片规则进行消息处理, 而普通控制器只能接收切片内的流。

与其他方案相比, OpenFlow+FlowVisor 的优势就是支持多控制器协同工作。然而, 目前用于多控制器之间信息交互的东西向接口标准并不统一, 且在规则冲突检测和链路虚拟化支持两方面存在不足。首先, 控制器只能实现直连物理链路虚拟化, 当通过多个控制域内设备连接构成一条多跳传输路径时, 控制器对物理链路故障的恢复不一定能满足承载要求; 其次, 控制器在下发流表项之前进行检测与修改, 但对规则互斥性没有检查, 无法有效避免服务路径逻辑冲突。

结合第 2.1 节的定义, 产生路径冲突问题的原因可描述如下: 当 SP 出现某段物理链路故障时, 链路级故障恢复只能保证 SP 数据通路的重建, 而 SP 上 SKN 的完备性和顺序性不能保证, 使得 ReSP 不具备全局性, 从而产生路径冲突, 如图 1 所示的 ReSP 上在 SKN_1 与 SKN_2 间的 AP 与 SP 冲突。

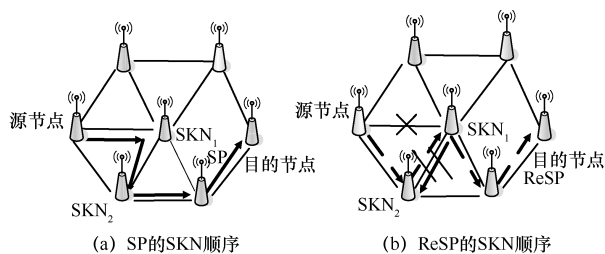


图1 服务路径冲突示意图

另外,若冲突发生在控制器之间,SKN₁和SKN₂间的AP恢复还需经过第3个控制器,如图2所示。所以,解决路径冲突问题的关键在于找到满足SR且与SP无冲突的ReSP,即保证ReSP的有效性。当SP上的SKN分属不同控制器控制时,除了保证ReSP的有效性外,保障冲突路径的快速重建也是必须考虑的因素。

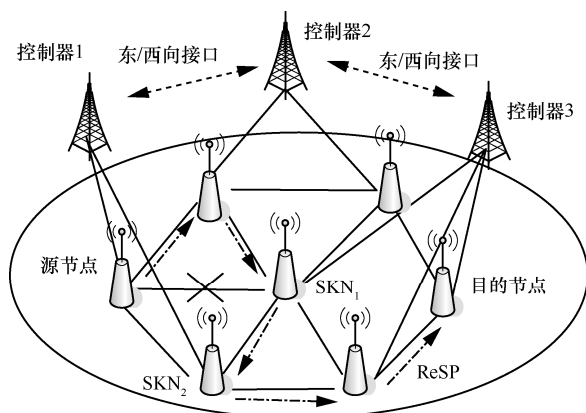


图2 控制器间服务路径冲突示意图

3 一种服务路径分级重建算法

3.1 分级重建的提出

针对基于SDN的移动自组织网络链路故障时服务路径重建导致的冲突问题,SP的快速有效重建既要考虑常见的单控制器网络,更要兼顾日趋流行的多控制器分布式部署方式。为此,本文提出一种服务路径分级重建思想:首先,依据故障给全网拓扑带来的破坏程度对重建目标进行分级;低级(low level, LL)以保护SP上受损的AP为目标计算ReSP,故障程度相对较轻;高级(high level, HL)以寻找一条尽量与SP没有重叠

物理链路为目标计算ReSP,故障程度相对较高。当故障SP跨越多个控制器时,控制器不仅要完成自控故障AP的重建,控制器之间往往要启动计算过程完成整条SP的重建。

实际应用中,控制器预先部署某些备份的AP,逐段AP重建出ReSP,做到轻微故障发生时无需启动控制器计算流程,达到快速重建SP的目的,这一阶段称为备份重建阶段;若预先部署的AP不能重建出满足SR的ReSP,则启动控制器计算流程以完成高级目标的SP重建,将这一阶段称为计算重建阶段。

另外,可以计算出满足定义5的多条ReSP,需要选出一定约束下(如花费、链路带宽)最优的ReSP作为最终重建成功的SP。在此,本文以链路代价最小为目标函数,如式(1)。

$$\min: \sum_{i=1} \text{Cost}(\text{AP}_{i,i+1}) \forall \text{AP}_{i,i+1} \in \text{ReSP} \quad (1)$$

3.2 重建判定

当SP上存在无备份的AP时,需要控制器参与ReSP的计算,则引出以下判定定理。

定理1 (链路可计算重建定理) 若拓扑 W 去掉链路 l_{uv} 仍能保证其连通性,则链路 l_{uv} 可重建。

证明: 由于去掉链路 l_{uv} 后 W 仍是连通图,则 W 上任意节点之间存在可达路径,则一定存在一条由节点 u 到节点 v 的路径,所以链路 l_{uv} 至少存在一条重建路径,即证 l_{uv} 可重建。

推论1 (AP可计算重建定理) 若 $\text{AP}_{i,i+1}$ 所对应的链路 $l_{i,i+1}$ 满足定理1则 $\text{AP}_{i,i+1}$ 可重建。

证明: 因链路 $l_{i,i+1}$ 满足定理1则存在重建链路,使得 $\text{AP}_{i,i+1}$ 可通过链路重建满足SR,得证。

定理2 (ReSP可由AP计算重建定理) 当且仅当ReSP与SP没有重叠物理链路,且按SP的SKN节点顺序包含其上所有节点时,该ReSP可由AP计算重建。

证明: 任取ReSP上 $\text{AP}_{i,i+1}$ 均满足推论1,且该ReSP上节点 i 到节点 $i+1$ 的转发顺序与 $\text{AP}_{i,i+1}$

上的顺序相同, 所以该 $AP_{i,i+1}$ 可由此 ReSP 承载。因此即证。

3.3 算法描述

基于上述分析, 给出 SP 分级重建算法的描述, 详情如下。

步骤 1 由推论 1 对 SP 上 AP 做判断, 当逐段 AP 以 SP 顺序都存在备份时, 以符合式 (1) 为目标逐段选择合适的 AP 生成一条 ReSP, 并唯一标识 ReSP, 下发相应流表, 进入步骤 9; 否则, 进入步骤 2。

步骤 2 拆解 (子) SP, 将 (子) SP 拆解成一段相邻 SKN 欧氏距离尽可能远且有备份的子 SP 以及另一段无备份的子 SP, 进入步骤 3。

步骤 3 启动 LL 阶段计算: 当仍存在无备份的子 SP 且此 SP 仍可以继续拆分时, 重新进入步骤 2; 当仍存在无备份的子 SP 且此 SP 不可以继续拆分时, 进入步骤 4。当不存在无备份的子 SP 时, 每段子 SP 以符合式 (1) 为目标生成一条 ReSP, 并唯一标识 ReSP, 下发相应流表, 进入步骤 9。

步骤 4 启动 HL 阶段计算: 若不可继续拆分的子 SP 只剩一段 AP 时, 去掉此 AP 对应的物理链路, 并以符合式 (1) 为目标, 按序经过原 SP 上的 SKN 重建以上子 SP, 进入步骤 6; 否则, 子 SP 为不可继续拆分的 SP, 对以上子 SP 上的每段 AP 以符合式 (1) 为目标进行重建, 进入步骤 5。

步骤 5 将步骤 4 重建的子 SP 与 SP 存在备份的子 SP 按 SKN 序生成一条 ReSP, 并唯一标识 ReSP, 下发相应流表, 进入步骤 9。

步骤 6 在每个控制器网络视图拓扑 M 中去除 ReSP 所有物理链路生成 M' , 若产生孤点, 进入步骤 7; 否则, 唯一标识 ReSP, 进入步骤 9。

步骤 7 若分属于不同控制器的 SKN 间链路无故障, 生成唯一标识的 ReSP, 下发相应流表, 进入步骤 9; 否则, 去掉拓扑 M 中分属于不同控制器的 SKN 间子 SP 上所有物理链路, 以符合式 (1) 为目标, 重建 SKN 间子 SP, 进入步骤 8。

步骤 8 将步骤 7 重建的子 SP 与各控制器内重建的子 SP 按原 SP 的 SKN 序生成一条 ReSP, 并唯一标识 ReSP, 下发相应流表, 进入步骤 9。

步骤 9 算法结束。

步骤 1~5 是依据备份的 AP 重建 SP; 步骤 6~8 是通过计算重建 SP, 其中的步骤 7~8 是控制器间计算 AP 过程。

4 实验验证与分析

为讨论分级重建法的有效性与时效性, 本文搭建图 2 所示拓扑, 同时在 Polska^[12]骨干网 (基于 SDH 的波兰电信实验网) 拓扑上同步测试, 由于图 2 拓扑比较简单, 只部署一个控制器, 在 Polska 上可部署多个控制器 (总节点在 250 个以上), 同时为每个拓扑分别随机生成 10 条 SP, 详见表 1 和表 2。

表 1 SKN 在同一控制器拓扑

拓扑	节点数量	链路数量	SKN 节点数量	路径需经过的 SKN 数量	预部署 AP 数量
图 2	7	10	1	2	3
Polska	18	55	7	5	5

表 2 SKN 在分属不同控制器拓扑

拓扑	节点数量	链路数量	SKN 节点数量	路径需经过的 SKN 数量	控制器数目	预部署 AP 数量
Polska	随机	55	7	8	5	8

将本文提出的分级重建方法与一般重构法和一般替代法进行比较, 后两种方法描述如下。

(1) 一般重构法

基于闭环控制的思想, 当链路故障发生时, 控制器完全重新计算 ReSP 以重建 SP, 典型方案如参考文献[13]。这种方法能够适应网络拓扑的变化, 但需要考虑相对较大的实时控制开销。

(2) 一般替代法

基于开环控制的思想, 控制器根据经验值预先部署若干条符合定义 5 的 ReSP, 当链路发生故



障时,控制器根据预部署 ReSP 重建 SP,典型方案如参考文献[6-7]。这种方法管理与维护相对方便,但经验值常依赖于对网络运维参数的收集与分析。

为公平比较分析各方法,设定如下 3 个评价指标。

(1) 重建成功率

为在 SP 不同链路故障下,路径重建的平均成功率。计算过程如下:

记 i 为故障 AP 的数目(本文中 $i \leq 5$),则 $n_i = \max(C_{|SP|}^i, 10)$ 为 i 条 AP 发生的故障次数($|AP|$ 表示 SP 上 AP 的数目),同时记第 j 条 SP 上(随机产生 10 条) i 条 AP 故障的重建成功次数为 W_i^j ,用式(2)计算:

$$\text{重建成功率} = \frac{\sum_{j=1}^{10} W_i^j}{n_i} \times 100\% \quad (2)$$

单控制器重建成功率比较如图 3 所示,结果表明,一般重构法重建成功率比一般替代法和 SP 分级重建法都高,但仍未达到 100%。这是由于一般替代法完全依赖 AP 备份,不能自适应计算重建,所以成功率最低;SP 分级重建亦可以完成实时计算,但存在 SP 上部分 AP 由备份重建,所以重建成功率略低于一般重构法。

在 Polska 网络上链路节点密度大,较不容易出现物理隔离,重建成功率整体提高。由于控制器数目增多,受路由等因素的影响,控制器间的 AP 重建失败次数增多,使得图 4(b)比图 4(a)重建成功率整体略有下降。就各重建方法而言,其有效性趋势与单控制器拓扑一致。

(2) 重建时延

为从 SP 故障到 SP 重建完成所花时间。记第 j 条 SP 上(计算能够重建的 10 条 SP) i 条 AP 故障的重建时延为 T_i^j ,用式(3)计算。

$$\text{重建时延} = \frac{\sum_{j=1}^{10} T_i^j}{n_i} \quad (3)$$

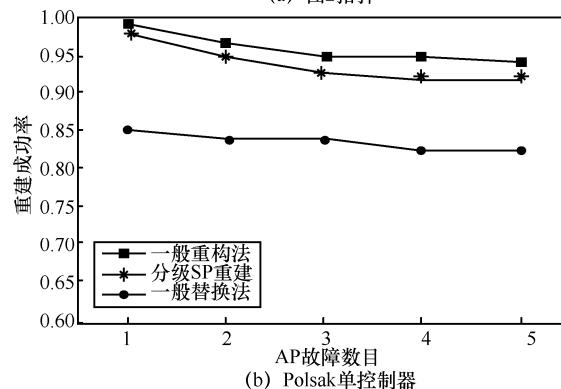
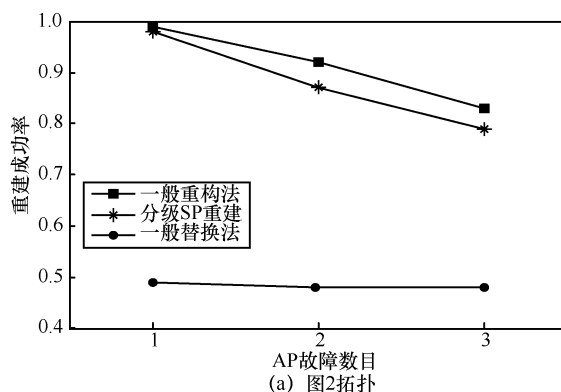


图3 单控制器重建成功率比较

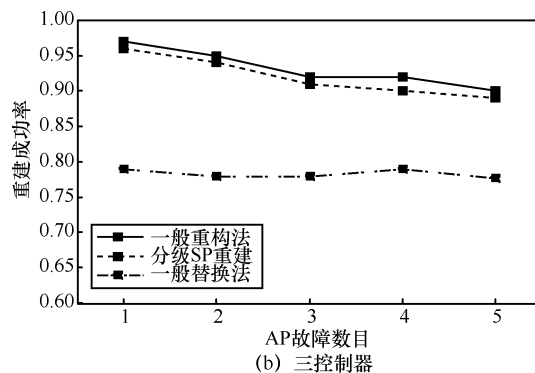
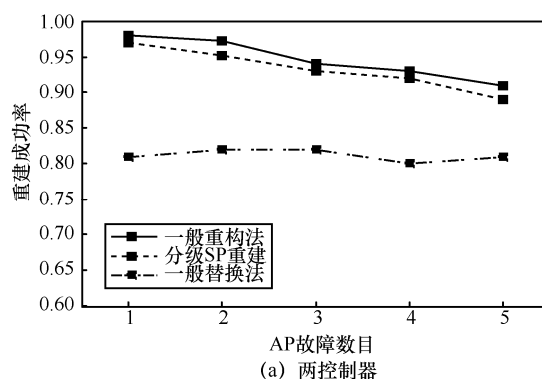


图4 多控制器重建成功率比较

重建时延比较如图 5 所示,结果表明,一般

替代法由于不需要启动控制器计算流程, 重建时延远远小于一般重构法; 图 5 (b) 表明在大型拓扑上, 分级重建法时延在毫秒级, 由于备份的 SP 的比例相对少于图 5 (a) 的简单拓扑, 所以一般替代法时延与分级重建法相当, 也都远低于一般重构法的秒级重建时延。

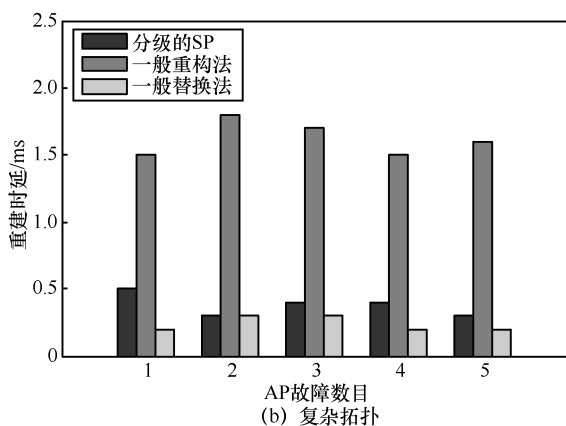
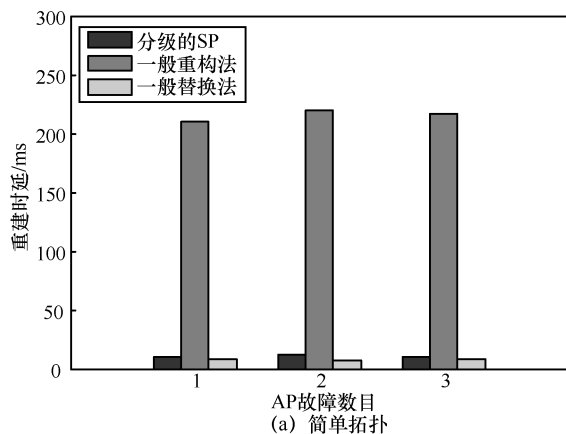


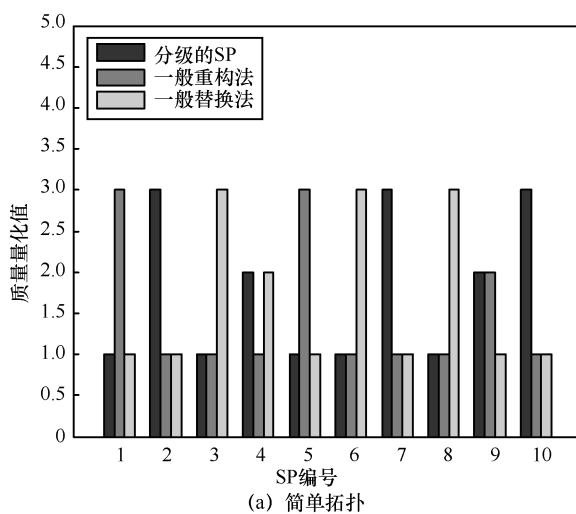
图 5 重建时延比较

(3) 重建 SP 质量

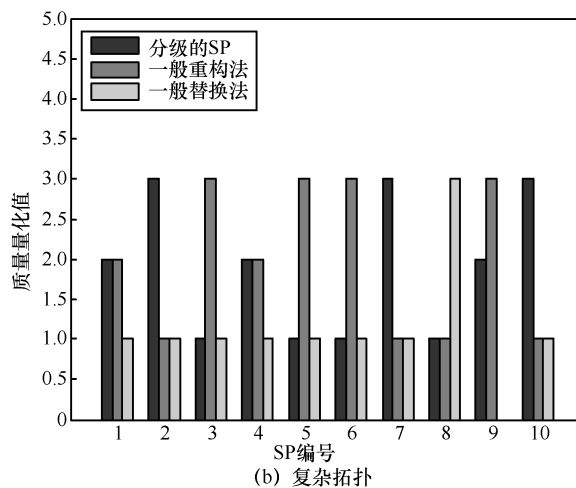
重建后的 SP 仍以其上每段 AP 可获得带宽和最大为优。过程如下: 首先, 在第 j 条 SP 上 i 条 AP 故障下, 计算各方法重建的 SP 上每段 AP 可获得带宽和; 其次, 做归一化处理, 即带宽和最大时量化值为 3, 居中者为 2, 最小者为 1, 重建不成功者为 0。所以, 以每条 SP 上的 i ($i \leq 5$) 条 AP 故障的质量重建量化值之和为大者为优。

重建 SP 质量比较如图 6 所示, 由于备份的 SP 是依据经验设定的, 故通过一般替换法重建的

SP 质量常优, 尤其是拓扑相对简单的情况, 如图 6 (a) 所示; 当拓扑复杂时如图 6 (b) 所示, 能够自适应计算的分级重建法和一般重构法重建的 SP 更容易得到较优的质量。



(a) 简单拓扑



(b) 复杂拓扑

图 6 重建 SP 质量比较

5 结束语

软件定义网络技术为移动自组织网络的服务路由选择、网络资源管理和规模化组网等引入了新的研究思路。传统服务路径重建方法侧重点在于在用户层面维持服务的连续性, 并未将无线链路故障影响考虑在内。而面对 MANET 无线链路的复杂性和不稳定性, 在进行链路参数抽象描述的基础上进行服务路径重建, 实现从链路级到服



务级路径的有效管理, 才是移动自组织网络服务路径重建的关键。

本文聚焦于链路故障引起的服务路径重建问题, 提出一种备份重建和计算重建相结合的服务路径分级重建方法, 可在快速重建服务路径的基础上保证重建服务路径的有效性。由于考虑到链路故障导致网络拓扑中孤点的存在, 使得此方法不仅可以避免控制器内的路径重建冲突, 也可有效解决控制器间服务路径关键点物理隔离带来的路径重建难题。与现有方法相比, 分级重建方法明显提高了路径重建速度, 重建时延降低 1 个量级, 单链路故障下路径重建时间小于 0.5 ms。

参考文献:

- [1] 刘宜明, 李曦, 纪红. 面向 5G 超密集场景下的网络自组织关键技术[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 44-51.
LIU Y M, LI X, JI H. Key technology of network self-organization in 5G ultra-dense scenario[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 44-51.
- [2] 赵军辉, 陈燕, 黄德昌, 等. 基于“端-管-云”体系的车载自组织网络关键技术[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 2-9.
ZHAO J H, CHEN Y, HUANG D C, et al. Key technology of VANET in terminal-management-cloud model[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 2-9.
- [3] LI H, DONG M, OTA K. Control plane optimization in software-defined vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 7895-7904.
- [4] SON S, SHIN S, YEGNESWARAN V, et al. Model checking invariant security properties in OpenFlow[C]//IEEE International Conference on Communication(ICC), June 9-13, 2013, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE Press, 2013.
- [5] ANDREW D F, ARJUN G, CHEN L, et al. Hierarchical policies for software defined networks[C]//The First Workshop on Hot Topics in Software Defined Networks(HotSDN), August 13, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM Press, 2012.
- [6] REITBLATT M, FOSTER N, REXFORD J, et al. Abstractions for network update[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 323-334.
- [7] STEPHENS B, COX A L. Deadlock-free local fast failover for arbitrary data center networks[C]//IEEE INFOCOM, April 10-14, 2016, San Francisco, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [8] FAYAZBAKHSH S K, CHIANG L, SEKAR V, et al. Enforcing network-wide policies in the presence of dynamic middlebox actions using flowtags[C]//USENIX NSDI, April 2-4, 2014, Seattle, WA, USA. New York: ACM Press, 2014.
- [9] RAJESH M, GNANASEKAR J M. Path observation-based physical routing protocol for wireless Ad Hoc networks[J]. Wireless and Mobile Computing, 2016, 11(3): 244-257.
- [10] LIU Z, LI Z, LI M, et al. Path reconstruction in dynamic wireless sensor networks using compressive sensing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(4): 1948-1960.
- [11] SHERWOOD R, GIBB G, YAP K K, et al. FlowVisor: a network virtualization layer[R]. 2009.
- [12] ORLOWSKI S, WESSÁLY R, PIÓRO M, et al. SNDlib 1.0-survivable network design library[J]. Networks, 2010, 55(3): 276-286.
- [13] QAZI Z A, TU C C, CHIANG L, et al. SIMPLE-flying middlebox policy enforcement using SDN[J]. Computer Communication Review, 2013, 43(4): 27-38.

[作者简介]



董芳 (1981-), 女, 信息工程大学信息系统工程学院副教授, 主要研究方向为移动自组织网络与软件定义网络等。



李鹏 (1961-), 男, 信息工程大学信息系统工程学院教授, 主要研究方向为移动自组织网络、传感网等。



莫有权 (1974-), 男, 信息工程大学信息系统工程学院副教授, 主要研究方向为网络信息技术、复杂系统仿真等。