

SDN 快速重路由机制创新与性能研究

杨元庆

广州城建职业学院, 广东 广州 510900

DOI: 10.61369/TACS.2025060036

摘要 : 如今, 基于软件定义资源构建网络的方式日益普及。与传统 IP 网络类似, 软件定义网络 (SDN) 也需应对连接故障带来的问题, 例如数据包丢失、服务中断和网络拥塞。故障发生后的恢复时间尤为关键^[1]。在大型拓扑结构的 SDN 中, 已有多种方法被提出以加速网络恢复过程。为缓解链路或节点故障造成的影响, 研究人员开发了多种快速重路由 (Fast Reroute, FRR) 方案。本文系统综述了当前 SDN 中的快速重路由机制, 重点介绍了其中几种常用技术, 包括 OpenFlow 快速故障转移组、OpenState 故障转移方法、无环备份路径 (Loop-free Alternate, LFA) 及远程无环备份路径 (Remote LFA, RLFA)。

关键词 : 快速重路由 (Fast Reroute, FRR); 快速故障转移 (Fast-Failover); 软件定义网络 (Software Defined Networking, SDN); OpenFlow 协议; OpenState; 无环备份路径 (Loop-Free Alternate, LFA); 远程无环备份路径 (Remote LFA, RLFA)

Innovation and Performance Research on SDN Fast Rerouting Mechanism

Yang Yuanqing

Guangzhou City Construction Vocational College, Guangzhou, Guangdong 510900

Abstract : The practice of constructing networks based on software-defined resources is becoming increasingly prevalent today. Like traditional IP networks, Software-Defined Networks (SDNs) also need to deal with issues caused by connection failures, such as packet loss, service disruptions, and network congestion. The recovery time after a failure is particularly critical [1]. In large-scale SDNs, various methods have been proposed to accelerate the network recovery process. To mitigate the impact of link or node failures, researchers have developed several reroute (FRR) schemes. This paper provides a systematic survey of the current FRR mechanisms in SDNs, focusing on several commonly used techniques, including the OpenFlow Fastailover Group, the OpenState Failover approach, the Loop-free Alternate (LFA),

Keywords : Fast Reroute (FRR); Fast-Failover; Software Defined Networking (SDN); OpenFlow Protocol; OpenState; Loop-Free Alternate (LFA); Remote LFA (RLFA)

引言

软件定义网络 (SDN) 是一种通过虚拟化传统网络基础设施而形成的新型网络架构, 广泛应用于数据中心、ISP、企业及教育网络等场景, 旨在简化大规模网络的管理与设计。该架构能够灵活扩展网络规模, 降低资源需求与运营成本, 并实现集中化控制。

SDN 采用控制平面与数据平面分离的多层逻辑结构。控制平面作为核心, 负责集中管理网络逻辑, 具备全局视野, 可统一调控数据平面中的设备路由。数据平面则由受控的网络设备构成, 包括物理硬件或虚拟交换机, 通过 OpenFlow 等协议接受控制平面指令, 并在出现故障时借助快速重路由机制 (如 OpenFlow Fast Failover) 进行修复。

网络通信通过可编程接口实现。南向接口用于控制平面与数据平面之间的通信, 北向接口则支撑管理平面与控制平面之间的交互。若系统中存在多个控制器, 它们通过东西向接口进行协调。

在 SDN 中, 快速重路由 (FRR) 的性能常以修复覆盖率衡量。若某一 FRR 机制能够应对所有单点故障 scenario, 则被认为具备 100% 的修复覆盖率。随着实时应用与数据存储需求的增长, SDN 因其在可编程性与集中管控方面的优势而持续发展。

一、现有 SDN 快速重路由 (FRR) 解决方案分析

在计算机网络中, 存等多种机制与协议用于确保源节点到目的节点始终存在可用路由, 并在发生故障时检测链路或节点故

障, 一旦检测到故障, 系统将启动计算流程, 寻找通往目标节点的新路径。与 IP 网络类似, SDN 中也需尽可能缩短服务中断时间, 特定服务等级协议 (SLA) 通常会对数据传输的中断容忍范围作出明确规定, 部分链路故障检测机制可独立于路由协议运

行，例如第2.1节将介绍的双向转发检测（BFD）协议^[2]。

当前已有多重IP快速重路由（IPFRR）机制，它们在备用路由计算方式上存在差异。其中最常用的包括无环备份路径（LFA）及其扩展版本——远程无环备份路径（RLFA）。其他现有IPFRR机制，尽管应用不如LFA和RLFA广泛，还包括等价多路径路由（ECMP）、多路由配置（MRC）、非经由地址（Not-Via Addresses）。此外，还有基于隧道的方法、最大冗余树（MRT）以及其他基于备份树的IPFRR机制。

下文将系统分析用于提升网络收敛性能的现有原理、机制及方法。

（一）双向转发检测（BFD）

双向转发检测（BFD）协议通过轻量级机制实现网络故障检测，其核心是在网络设备之间周期性地发送“hello”消息（保活报文），设备间通过三次握手建立连接，连接建立后，两端通过持续交换BFD报文以确认链路状态。报文发送间隔可配置，间隔越短，故障发现速度越快。BFD的优势在于其协议独立性，可部署于多种传输协议之上。例如，可在Open vSwitch（一种支持OpenFlow的虚拟交换机）上部署BFD，用于在软件定义网络中连接网络设备与控制器^[3]。

（二）OpenFlow 快速故障转移组

当链路发生故障时，OpenFlow交换机需与控制器协同以恢复网络连接，具体流程包括：（1）故障检测与受影响路由信息收集；（2）利用最短路径优先（SPF）算法计算备份路径；（3）将更新后的流表项下发至交换机。

自OpenFlow 1.1版本起引入的组表（Group Table）功能，可支持流表所不能实现的复杂数据包操作。流表是对传统路由硬件行为的抽象，而组表则用于根据预定义指令对数据包执行各类OpenFlow操作。受SDN集中式架构限制，网络故障评估存在延迟：检测到的故障需上报控制器，由其计算新路径。该延迟对于要求故障恢复时间低于50毫秒的运营商网络而言是不可接受的。在传统OpenFlow机制中，交换机通过接收“Flow-mod”消息获取新路径，该消息包含更新后的流表项。仅当交换机检测到链路故障或缺少某目的地的路由时，才会发送“Packet-in”消息触发该过程。这一与控制器的通信过程正是延迟的主要来源。

快速故障转移组功能使交换机能够在检测到链路故障时自主选择备份路径，无需控制器介入，从而显著加快故障恢复速度。该功能通过预定义的监控端口或监控组参数评估路径可用性：若主端口故障，则自动切换至备份转发组。需注意，OpenFlow采用“被动响应”机制，即仅在主路径故障后才启用备份路由，流表更新发生在新路由计算完成之后。

每条流表项均具有可配置的生命周期，通过两种超时机制进行管理：

空闲超时（Idle timeout）：若流表项在指定时间内未被匹配，则被删除；

硬超时（Hard timeout）：无论是否被使用，流表项在达到设定时间后均被移除。

超时设置直接影响故障恢复速度：较短的超时时间可提高流

表更新频率，但也会增加控制器负担。

（三）基于OpenState的故障转移

考虑到SDN控制器的集中式控制模式，研究者提出将部分计算任务下放至交换机，以减少控制器负担和路由决策延迟。为此，OpenFlow协议扩展出OpenState功能，使交换机能够处理部分状态相关的转发逻辑。

在OpenState架构中，除流表外，交换机还维护一个状态表。数据包首先在状态表中进行匹配：若结果为0（即不匹配），则按主路径转发；若非零，则按备份路径转发。随后，数据包仍须经流表进一步处理。可通过“SET_STATE”操作动态更新状态表项，流程如图1所示。

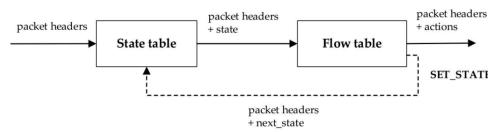


图1 OpenState 数据流状态表

OpenState支持“全局状态”，该状态作用于整个交换机的策略与流控，而非仅针对单一流。当交换机需通过故障链路转发数据时，可触发回退机制（crankback mechanism）：数据包被标记并退回上一跳节点，由该节点尝试新路径。若无备份路由，交换机向控制器发送“Packet-in”消息，请求计算新路由。计算完成后，控制器通过“Packet-out”消息广播新路径。

（四）无环备份路径（LFA）与远程无环备份路径（RLFA）

无环备份路径（LFA）是传统IP网络中广泛使用的快速重路由机制。其核心思想是预先计算备份下一跳，使得在主路径故障时能迅速切换，从而实现快速收敛。

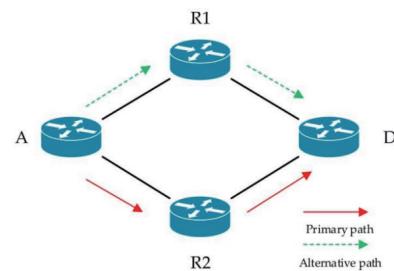


图2 LFA 数据转发路径

以图2为例，数据包从路由器A发往D：常规路径中，A通过R2转发至D。LFA机制则额外计算通过R1的备份路径。有效备份下一跳需满足两个条件：一是与源路由器直连，二是能形成无环路径。

远程无环备份路径（RLFA）通过创建隧道实现迂回路由，避免影响其他流量。如图3所示。

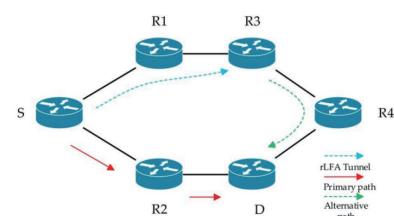


图3 RLFA 数据转发路径

若S与R2间链路故障，且无其他LFA可用，S可通过隧道

将流量转发至 R3（作为间接邻居），由 R3 作为 LFA 节点将数据包传至 D。需注意，在某些网络拓扑中，设备故障可能引发问题。

尽管 LFA 被广泛视为快速重路由的标准方案，它仍存在一定局限：例如，可能无法为所有网络位置找到合适的 LFA，从而无法提供完全连接保护；此外，在多故障场景中，某些 LFA 可能引发临时环路。

文献提出一种在 SDN 中应用 LFA 及其变体的方法，并引入环路检测机制：数据包头部添加位串，每位代表一个网络设备。设备转发数据包时修改对应位。若收到自身位已被设置的数据包，则丢弃该包，以避免环路^[4,5]。除 RLFA 外，还有高级环路检测与终止（ALDT）机制和显式路径隧道无环备份路径（eLFA）等替代方案。ALDT 可避免数据包在首次重定向后立即被丢弃；eLFA 通过创建显式隧道实现节点保护，但需占用更多流表空间。这些机制的计算可在辅助服务器或应用层完成。在 OpenFlow 环境中，LF 可通过流表与组表的组合实现，无需额外开发；而 RLFA 和 eLFA 等技术则需要额外工具支持隧道建立或封装操作。总体而言，这些方法在避免环路方面表现出比传统 LFA 更高的效率。

二、讨论

在第 2 节中，我们综述了软件定义网络（SDN）领域中若干兼具理论价值与实用潜力的重路由及快速重路由机制。从实现复杂度和部署便利性角度看，最能有效加速 SDN 网络决策过程的机制是快速故障转移组（Fast Failover Groups）及基于 OpenState 的技术方案。这些机制或属于 OpenFlow 协议原生组成部分，或作

为其扩展组件被广泛认可^[6]。其共同设计目标是在网络设备无法独立判定最优数据路由时，尽可能降低对控制器的依赖^[7]。

在模拟拓扑中，研究人员还对一组改进的 LFA 机制（特别是 eLFA 和 ALDT）进行了多场景测试，包括链路故障、节点故障及特定节点保护等情形。实验结果表明，这些机制组合使用能有效避免环路产生，同时显著减少所需路由表项或规则数量（最多可减少 50%）。然而，上述方案目前仅基于真实拓扑模型完成测试，尚未在仿真环境中进行系统验证^[8]。

未来研究有必要对当前 SDN 控制平面所用各类控制器开展深入分析，以评估它们在快速重路由方面的实效性，从而推动更高效、可靠的故障恢复解决方案的发展^[9,10]。

三、结论

本文系统梳理了软件定义网络（SDN）中若干重要的重路由机制。重路由与快速重路由机制是 SDN 的核心功能特征，能够在网络发生故障时实现快速恢复，并可在不同层级（应用层、控制层与数据层）灵活部署。快速重路由机制能显著缩短故障导致的业务中断时间，有效增强网络弹性，因此已成为各类依赖高可用网络架构的组织中不可或缺的关键技术。在具体选用与部署时，需综合考量其适用场景与潜在限制，审慎权衡不同机制的性能与代价。

总体而言，这些避免网络服务中断的技术手段，为提升软件定义网络环境中的可靠性及运行效率提供了重要保障，是构建高性能、高可用下一代网络的关键支撑。

参考文献

- [1] 陈自强, 夏正友. 一种拥塞避免的 SDN 单链路故障恢复模型 [J]. 计算机科学, 2023, 50(4): 212–219.
- [2] 蓝俊伟, 张奇文, 郑伟平, 等. 基于链路位置的 SDN 数据平面故障恢复方法 [J]. 华南师范大学学报（自然科学版）, 2023, 55(5): 111–120.
- [3] 王晓亮, 谢安, 陆桑璐. 一种基于软件定义网络技术的网络容灾恢复系统及方法: CN105553728A[P]. 2016-05-04.
- [4] 孙文锐, 王昌达. SDN 中基于 MS-KNN 算法的 LFA 检测方法 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2832–2836.
- [5] Nagarathna Ravi, S. Mercy Shalinie, D. Danyson Jose Theres. BALANCE: Link Flooding Attack Detection and Mitigation via Hybrid-SDN[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, 17(3): 1–12. DOI:10.1109/TNSM.2020.2997734.
- [6] 葛玉伟. "一种光电多层重路由保护协同方法和装置 [P/OL]." , CN113840183A. 2021.
- [7] 刘保菊, 喻鹏, 丰雷, 等. 电力 SDN 通信网中面向负载均衡的路由重构 [J]. Beijing Youidian Xueyuan Xuebao/Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 000(2):7.
- [8] 王盛. 面向数据中心的 SDN 链路负载均衡策略改进研究 [D]. 湖南大学, 2020.
- [9] 孙萌等. "一种面向多流共存的 SDN 网络多链路故障恢复方法及系统 [P/OL]." , CN109768924B. 2021.
- [10] 侯筠仪, 赵黎晔, 申景诗, 等. 基于 SDN 架构的 NFV 技术在低轨卫星网络中的应用 [J]. 中国空间科学技术, 2021.DOI:10.16708/j.cnki.1000-758X.2021.0042.