

基于 SDN 的多路径路由选择优化研究

杨湧 刘伯成 宋剑

赣东学院 信息工程学院 江西抚州 344000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16055

[摘要] SDN 是将控制平面从数据平面中解耦的网络架构, 适用于多种网络应用程序。为探明基于 SDN 的多路径路由选择优化可行性, 利用仿真实验法, 将传统的多路径路由与 SDN 网络相结合, 兼顾网络链路多属性状态与网络业务链路权重计算片面性问题, 搭建模型。随后, 针对网络业务服务质量 QoS 需求的最优路径选择问题, 提出基于 SDN 体系架构的蚂蚁寻优筛选 QoS 最优路径方案, 进一步优化路由。实验结果得出: 基于 SDN 体系架构的蚂蚁算法可以筛选 QoS 最优路径并实现路由优化。

[关键词] SDN; 多路径路由选择; QoS

在网络规模持续扩大的背景下, 互联网业务类型愈发复杂, 流量持续增加, 对互联网传输质量提出了更高的要求。与此同时, 作为互联网核心的路由器面临着愈发精密的功能要求和愈发迫切的扩展需要。SDN 即 Network Defined Software (软件定义网络), 是借助软件编程的方式进行网络定义、控制的一种新型网络创新架构。将 SDN 应用到多路径路由选择中, 可实现网络流量的灵活控制。因此, 探究基于 SDN 的多路径路由选择优化具有非常突出的现实意义。

1. 实验部分

1.1 问题描述

假定在 3 颗卫星 GEO (Geostationary Earth Orbit) 卫星与地面基站全部路由器均为 SDN 路由器, 抽象处理集中的 SDN 控制网络, 获得一个有向图 $G(R, M)$ 。其中 R 、 M 分别表示 SDN 控制网络内路由器集合、链路集合。在流量信息明确的情况下, SDN 控制器需要根据网络最佳性能指标与最优流量工程优化效果获得需求为每一业务计算转发路径。整个网络流量守恒公式如下:

$$\sum_{i \in N} IN_i = \sum_{j \in N} OUT_j \quad (1)$$

式 (1) 表示节点发出总流量等于节点接收总流量。其中 IN_i 表示注入点 i 的数据流, OUT_j 表示流出点 j 的数据流。在整个网络流量守恒的情况下, 单个节点的流量与整体网络流量变动规律相符, 均遵循 (1) 输入与输出流量守恒机制。

1.2 模型建构

1.2.1 模型架构

基于 SDN 的多路径路由优化网络模型由两层微信网络与地面节点构成, SDN 控制器负责网络管控, 数据包转发则由转发层 LEO (Low Earth Orbit) 节点负责, SDN 控制器模型 (含接口) 结构见图 1。

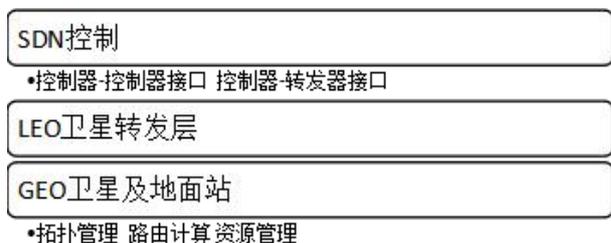


图 1 SDN 控制器模型

根据图 1, SDN 控制器模型的控制层包括 GEO 卫星、地面站与中轨道 MEO (Medium-Earth Orbit) 卫星, 采用 SDN 进行网络通信设备控制层、用户面解耦, 从逻辑层面集中控制面并简化标准接口管理功能、监控 LEO 全局链路状态、路由计算、流程表下发。SDN 控制器模型的接口包括控制器-转发器接口 OpenFlow、控制器-控制器接口 Follflight API。其中控制器-转发器接口由 OpenFlow 标准定义并由 OpenFlow 控制器接口实现; 控制器-控制器接口 Follflight API 负责多 SDN 控制器共享信息, 协同管理整个网络^[1]。Geo 卫星及地面站资源管理负责在控制器-转发器接口的帮助下, 进行最新链路状态信息 (最大链路可用率、转发性能) 的收集; Geo 卫星及地面站拓扑管理负责根据 LLDP (Link Layer Discovery Protocol) 链路, 实时追踪、寻找协议, 并结合网络链接, 存储聚合网络拓扑信息; Geo 卫星及地面站路由计算负责根据最新网络拓扑、链路状态数据, 核算路由。随后依托 SDN 可编程性, 以低延迟、低损耗、高分配为基准, 更新低轨道卫星网络数据转发规则。

在 LEO 网络转发层, 低轨道卫星通信系统是核心, 与星座轨道平面、单轨道卫星颗数有关。1 颗卫星星间链路为 4 条 (2 条同一轨道的轨内链路、2 条相邻轨道的轨间链路), 根据卫星运动, 轨间链路持续切换。在卫星链路运转过程中, 一组数据通信节点由用户卫星、地面节点、中继卫星构成, 与链路集合、星地集合、节点之间代价函数、卫星拓扑更新时间间隔等有关。

1.2.2 约束条件

SDN 控制器模型约束条件如下:

$$\begin{cases} Q_d \geq p_d^s \\ Q_p \geq p_d^s \\ Q_h \leq p_d^s \\ C_d^s = \sum p_d^s \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, Q_d 表示每条链路时延约束条件, Q_p 表示每条链路丢包率约束条件, Q_h 表示每条链路带宽约束条件, C_d^s 表示每条链路传输代价累积约束条件。 p_d^s 表示节点 s 到节点 d 的链路传输性能。

1.2.3 性能参数

在模型中, 涉及端到端链路延迟、丢包率、节点负载、剩余带宽、链路代价等性能参数^[2]。链路延迟由链路传输时延(从源节点到目的节点的数据传输耗时)与链路传播时延(从源节点到目的节点的数据传播耗时)构成, 可作为服务质量(QoS, Quality of Service)的评估依据, 辅助链路响应速度、传输性能计算。

丢包率与节点发送数据包总数、节点接收数据包总数有关, 用于链路传输性能评估。

节点负载与节点发送队列数据包数量(特定时刻某一节点发送队列数据包数量)、节点发送队列的总长度(特定时刻某一节点发送队列的总长度)有关, 较高的节点负载标识节点工作量较大^[3]。

剩余带宽标识链路中未被占用的数据传输量, 与节点指定端口带宽(链路总带宽)、节点端口字节发送率(从某一节点发送到链路的数据字节数)、节点端口字节接收率(从某一链路接收节点的数据字节数)有关, 用于链路可用带宽情况的评估^[4]。

链路代价是链路初始权重、链路稳定度、链路负载度归一化的结果, 与链路稳定度最小值、链路初始权重值的最大值、链路稳定度最大值、链路初始权重值最小值、链路负载度的最小值与最大值有关。

1.3 算法优化

1.3.1 传统基于 SDN 的多路径路由算法

在 SDN 架构内, 根据卫星上有限存储计算资源最大化利用需求, 借助 SDN 控制器的映射功能, 完成网络内各节点的虚拟化, 拓展地球静止轨道低轨道卫星、中轨道卫星节点的链路状态数据存储空间^[5-7]。在存储空间内, 打造 MPLS (Multi-Protocol Label Switching, 多协议标签交换) 网络, 以标签形式集成若干虚拟节点信息, 并汇总到协议流表。协议流表内信息可经接口实现低轨道与中轨道卫星交互。步

骤如下:

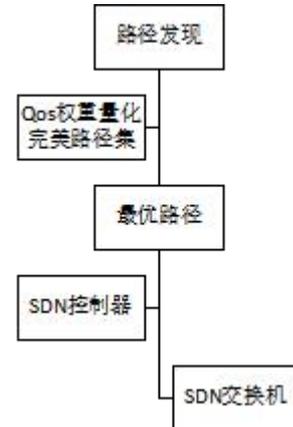


图2 传统基于 SDN 的多路径路由算法

图2中, 路径发现模块与 SDN 控制平面之间为北向接口 Floodlight API, SDN 控制器 Floodlight 与 SDN 交换机之间接口为南向接口 OPenFlow。根据图2, 传统基于 SDN 的多路径路由算法由星间链路状态信息交互、低轨道卫星路由计算构成, 路由计算最优路径是链路稳定度、链路负载度、链路初始权重函数加权的結果, 在时间复杂度为常数级的情况下, 定义虚拟 MPLS 卫星网络内链接因子, 链接因子为 1 表示在卫星节点与另外一个节点之间存在链路, 链接因子为 0 表示卫星节点与另外一个节点之间不存在链路。同时定义卫星节点与另外一个节点之间的链路链接状况——链接矩阵, 根据链接矩阵计算从源卫星节点到目的卫星节点的标签交换路径集合——集路径的初始权重值。随后, 定义链路可获得带宽矩阵(当前卫星链路中可用剩余带宽的最大值与源卫星节点到目的卫星节点的剩余可用带宽)、传播时延矩阵(当前卫星网络链路最小传播时延与源卫星节点到目的卫星节点的传播时延)。

在定义初始权重的基础上, 根据链路切换、服务质量(QoS)保障所需, 进行不同业务服务类型的定义, 见表1。

表1 传统基于 SDN 的多路径路由算法业务服务类型

服务类型编号	带宽	丢包率	延迟	示例
1	大	低	高	视频会议
2	大	高	高	大文件数据传输
3	小	低	低	信号指令数据传输

根据表1, 定义基于软件定义网络的多路径路由算法链路稳定度、链路负载度, 分别为目的节点到源节点各星间链路剩余生存时间、端到端业务申请时节点负载程度, 实现网络流量负载的均衡、动态分配。在一个轨道周期内, 卫星星座系统内星间链路通断涉及多次切换, 星间链路的生存时间与链路建立时刻、链路断开时刻以及卫星星座系统的运动

周期有关。而链路负载度是可经流量检测网络实时分配，并由 SDN 控制器全程控制，与某一时刻星间链路被分配流量负载、全部卫星集合总条数有关。



图 3 基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法步骤

1.3.2 基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法

针对基于 SDN 的多路径路由优化服务质量约束目标，从转移概率着手，进行算法优化。即设定蚂蚁在某一时刻从一

表 2 基于 SDN 的多路径路由选择算法收敛效果对比

收敛效果/算法	最优解迭代次数	最优解迭代时间 (s)	链路稳定度		
			服务类型 1	服务类型 2	服务类型 3
传统基于 SDN 的多路径路由算法	10	2.0	0.5	0.4	0.3
基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法	7	1.5	0.7	0.6	0.8

根据表 2，传统基于 SDN 的多路径路由算法链路稳定度最高仅为 0.5，基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法链路稳定度最高可达到 0.8。表明不同服务类型下，基于 SDN 的多路径路由算法优化前后链路稳定度具有差异，基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法链路稳定度在不同服务类型中的链路稳定度均高于传统基于 SDN 的多路径路由算法链路稳定度。

个节点到另外一个节点移动的概率为 P ， P 为特定时刻特定路径上信息素浓度与同一时刻同一路径启发度的乘积，与上一时刻信息素浓度、上一时刻特定路径信息素增量、上一时刻启发度、上一时刻同一路径启发度增量以及启发因子（表示信息素与启发度的相对重要程度）有关。在此背景下，拓扑内残留信息素处理的节点是蚂蚁完成若干节点的遍历后，处理信息素更新规则与信息素挥发效率、信息素挥发系数、上一时刻路径信息素增量（蚂蚁在路径上信息素增量）、上一时刻路径信息素浓度等具有较大关系，算法优化步骤如图 3。

根据图 3，基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法在初始化参数后，将蚂蚁放置到初始位置获得集群集合，判定是否同时满足时延、带宽、丢包率的约束条件，若满足，则根据路径代价计算状态转移概率选择节点，并根据路径加入路径集进行路径代价的计算。判定路径代价是否大于限值，若是，则获得最优路径，反之则返回初始化重新循环。

2. 结果与讨论

2.1 收敛性实验结果

采用 SDN 控制器（Floodlight）iPerf 网络测速工具、网络模拟器（Mininet/ENSP）与 Wireshark 网络分析软件联合搭建仿真实验环境。在联合仿真实验环境中，设定 LEO 轨道高度为 780km，轨道卫星数目为 11，轨道数目为 6，轨道周期为 6840s，轨道倾角为 86.4° ，轨道最小仰角为 8° 。同时，设定 GEO 轨道高度为 36000km，轨道周期为 24h，轨道卫星数目为 3，轨道数目为 1，轨道最小仰角为 8° ，轨道倾角为 45° ，星间链路、星际链路、星地链路时延需求分别为 $1\sim 10\text{ms}$ 、 $10\sim 20\text{ms}$ 、 $20\sim 50\text{ms}$ ，星间链路、星际链路、星地链路丢包率需求分别为 $0.01\%\sim 0.05\%$ 、 $0.05\%\sim 0.1\%$ 、 $0.1\%\sim 0.5\%$ ，星间链路、星际链路、星地链路带宽容量需求分别为 $10\sim 20\text{Mbps}$ 、 $20\sim 50\text{Mbps}$ 、 $50\sim 100\text{Mbps}$ 。

表明基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法更加适用于多路径路由选择。

在设定条件下，基于 SDN 的多路径路由蚁群优化算法收敛获得最优路径的迭代次数是 7 次，耗时为 1.5s。传统基于软件定义网络的多路径路由算法需要 10 次迭代方可获得最优路由选择路径，耗时 2.0s。从迭代收敛来看，蚁群算法优

化后的软件定义网络多路径路由选择算法性能更加优良。

表3 基于SDN的多路径路由选择算法吞吐量对比

吞吐量/算法	吞吐量 (Mbps)	
	流表未溢出	流表溢出
传统基于SDN的多路径路由算法	4	1
基于SDN的多路径路由蚁群优化算法	8	5

2.2 吞吐量性能实验结果

依托Floodlight SDN控制器、南北向接口与SDN交换机构成的仿真平台, 设定链路带宽为30Mbps, 时延为10ms, 丢包率为1%, 经Iperf工具实现链路拥塞, 经wget命令、cvlc命令分别实现下载文件、推送高清视频流, 并设定文件传输平均带宽与视频传输平均带宽在5Mbps、6Mbps。流表未溢出、流表溢出两种场景下, 评估基于SDN的多路径路由蚁群优化算法、传统基于SDN的多路径路由算法对业务QoS的保障性能, 得出结果见表3。

根据表3, 流表未溢出与溢出两种场景下, 在特定时间

表4 基于SDN的多路径路由选择算法最大链路利用率对比

条件/算法性能	链路最大利用率		网络中丢包链路数		经过拥堵链路的服务量	
	小服务矩阵	大服务矩阵	小服务矩阵	大服务矩阵	小服务矩阵	大服务矩阵
传统基于SDN的多路径路由算法	0.32	1.02	0	4	0	4
基于SDN的多路径路由蚁群优化算法	0.28	1.97	0	2	0	2

由表4可知, 在服务矩阵较小(服务带宽远小于链路容量)且路由完成全部服务类型(1/2/3)后未出现链路丢包的情况下, 传统基于SDN的多路径路由算法与基于SDN的多路径路由蚁群优化算法在优化效果差距不大, 均可行。在服务矩阵较大(服务带宽远超出链路容量)且路由完成全部服务类型(1/2/3)后出现链路丢包的情况下, 基于SDN的多路径路由蚁群优化算法显著优于传统基于SDN的多路径路由算法, 表明基于SDN的多路径路由蚁群优化算法更适合业务矩阵较大情况下的路由选择。

3. 结论

综上所述, 较之传统基于SDN的多路径路由算法, 利用蚁群算法优化的软件定义网络多路径路由算法能够实现路由灵活全局控制, 获得收敛时间更短, 流表溢出与未溢出场景下吞吐量更大, 且在服务矩阵较大情况下的链路利用率更高, 在实际网络环境中应用的优势更加突出。

[参考文献]

- [1]王坤, 吕光宏, 胥林, 等. 分布式软件定义网络中多域流量工程的路由优化方法[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(07): 110-124.
- [2]张晓莉, 柳珍, 郭庆. 基于改进深度强化学习的SDN

内启用QoS路由机制并向链路增加负载促使链路拥塞状况改变, 观察吞吐量变化。启用QoS路由机制后, 链路出现拥塞, SDN控制器立即为客户端调整路径, 优选非拥塞路径传输文件数据或高清视频流。触发重新选路的最低吞吐量阈值为2.5Mbps, 启用QoS路由机制后文件或高频视频客户端平均吞吐量下降到阈值2.5Mbps后迅速回升至满足QoS保障的水平。其中传统基于SDN的多路径路由算法吞吐量变化幅度小于基于SDN的多路径路由蚁群优化算法吞吐量变化幅度, 且吞吐量回升时刻滞后于基于SDN的多路径路由蚁群优化算法吞吐量回升时刻。表明基于SDN的多路径路由蚁群优化算法的QoS路由机制反应较为灵敏, 可以有效控制客户端吞吐量。

2.3 链路利用实验结果

为验证算法性能, 设定卫星星座涵盖4个轨道平面, 轨道倾角、高度分别为86.4°、1375km, 每一轨道涵盖9颗卫星, 相位因子为0, 且轨间链路数与轨内链路数均为2的条件下比较基于SDN的多路径路由选择算法, 得出结果见表4。

智能路由[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(08): 150-154.

[3]刘思远, 杜海燕, 李丽, 等. 基于SDN与传统路由相结合的网络架构设计[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(04): 126-130+137.

[4]高新成, 刘威, 王启龙, 等. 基于SDN的混合分段路由概率流调度机制[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(11): 3382-3387.

[5]李竞博, 马礼, 马东超, 等. 基于SDN的一体化融合网络路由调度机制[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(04): 84-90.

[6]蓝俊伟, 张奇支, 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(05): 111-120.

[7]曹健, 王兴伟, 黄敏, 等. 一种工业物联网多路径可靠路由机制[J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(04): 862-867.

作者简介: 杨湧, 1974.6.6, 男, 汉族, 江西金溪, 职称: 讲师, 硕士研究生, 专业和研究方向: 计算机网络。

支撑项目: 江西省教育厅科技研究项目, 项目名称: 基于SDN的多路径路由选择优化研究, 项目编号: GJJ2203704。