

# 多模态网络环境下网络模态共存与优化部署方法

涂化清<sup>1</sup>, 廖君虎<sup>2</sup>, 朱俊<sup>1\*</sup>, 邹涛<sup>1</sup>, 李传煌<sup>2</sup>, 张汝云<sup>1</sup>, 邬江兴<sup>1</sup>

(1. 之江实验室, 浙江杭州 310000; 2. 浙江工商大学, 浙江杭州 310000)

**摘要:** 为解决多模态网络数据平面资源分配和业务流量用网需求的适配问题, 文章提出了一种多模态网络环境下网络模态共存与优化部署方法. 该方法充分考虑多模态网元资源约束、链路资源约束、流量转发延迟等关键约束以保障用户服务质量, 并通过联合路由优化的方法确保每种网络模态的连通性. 由于直接建模后的网络模态部署问题是非凸问题, 难以直接求解, 因此文章将原问题等价转换为0-1整数线性规划问题, 并在此基础上设计基于随机舍入的网络模态部署与路由选择算法. 理论分析表明, 该算法具有 $O(\log n)$ 的近似比性能, 其中 $n$ 是网络中多模态网元的数量. 仿真实验结果表明, 所提方案可实现网络模态在数据平面的高效部署. 在满足网络资源、流量转发延迟约束的前提下, 通过3~6种不同数量网络模态分别在8000条流的情况下进行实验, 结果表明, 所提算法相较于对比算法可有效降低13%~22%的链路负载.

**关键词:** 多模态网络; 网络模态部署; 可编程数据平面

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.U22A2005); 国家重点研发计划(No.2022YFB2901503); 中国博士后科学基金(No.2024M75986)

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)05-1650-11

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250015

## Network Modal Coexistence and Optimal Deployment Method in Polymorphic Network Environment

TU Hua-qing<sup>1</sup>, LIAO Jun-hu<sup>2</sup>, ZHU Jun<sup>1\*</sup>, ZOU Tao<sup>1</sup>, LI Chuan-huang<sup>2</sup>, ZHANG Ru-yun<sup>1</sup>, WU Jiang-xing<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Laboratory, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

2. Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

**Abstract:** To solve the problem of adapting the resource allocation in the data plane of polymorphic network to the network usage requirements of service traffic, this paper proposes a method for the coexistence and optimized deployment of network modals in a polymorphic network environment. This method considers key constraints such as polymorphic network element resource constraints, link resource constraints, and traffic forwarding delay to ensure the quality of user services. It also ensures the connectivity of each network mode through joint routing optimization. Since the direct modeling of the network modal deployment problem is a non-convex problem and difficult to solve directly, this paper transforms the original problem into a 0-1 integer linear programming problem. Based on this, a network modal deployment and routing selection algorithm based on stochastic rounding is designed. Theoretical analysis shows that this algorithm has an approximation ratio of  $O(\log n)$ , where  $n$  is the number of polymorphic network elements in the network. Simulation results demonstrate that the proposed approach can achieve efficient deployment of network modals in the data plane, effectively reducing link load by 13% to 22% while satisfying network resource and traffic forwarding delay constraints.

**Key words:** polymorphic networks; network modal deployment; programmable data plane

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.U22A2005); National Key Research and Development Project of China (No.2022YFB2901503); China Postdoctoral Science Foundation (No.2024M75986)

## 1 引言

随着数字化时代垂直行业应用的蓬勃发展, 工业互联网、车联网、远程医疗、机器人控制、视频点播等新

型服务模式不断涌现, 对网络的大带宽、高可靠、低时延、巨连接等核心能力提出了更高要求, 已远远超出了传统网络多媒体服务的范畴. 面对上述需求的演进变

化,一批颇具特色的新型网络模态发展迅速,如身份标识网络<sup>[1]</sup>、命名数据网络<sup>[2]</sup>、移动优先网络(mobility first)<sup>[3]</sup>等被相继提出,已在部分行业网络中初步应用并取得良好效果.然而,现有互联网采用单一网络技术体制,无法从根本上同时承载上述多种网络模态.为此,战略支援部队信息工程大学邬江兴院士团队提出多模态网络环境的思路,采用“技术体制与网络环境分离”思想,实现多种网络模态在同一基础网络平台上的共生、演进和变革发展,以多元化的网络技术体制来适配多种不同需求的垂直应用行业或领域,支持各种网络模态在同一基础设施(多模态网络环境)上动态加载和运行<sup>[4-6]</sup>.

如图 1 所示,多模态网络的数据平面由多模态网元组成,包括接入级多模态交换机和核心级多模态交换

机.每个多模态网元可承载多种网络模态程序.在多模态网络环境中,网络管理员需在多模态网元上部署网络模态程序以满足不同网络模态终端的需求.随着不同垂直领域的各类网络应用不断增长和多样化,生成网络模态的需求变得复杂多样.由于异构资源的复杂性,业务流服务质量和多模态网络资源使用之间的权衡问题愈发显现,出现服务质量未达标或者多模态网络资源浪费的情况,与统一的物理资源向差异化的上层业务性能指标的适配要求背道而驰.因此,面对多样化网络模态的需求,如何在多模态网络环境中生成网络级的网络模态部署方案,最大化网络模态生成需求与网络资源效能的拟合度,实现网络模态在多模态网络数据平面中的高效部署,是亟待解决的问题.

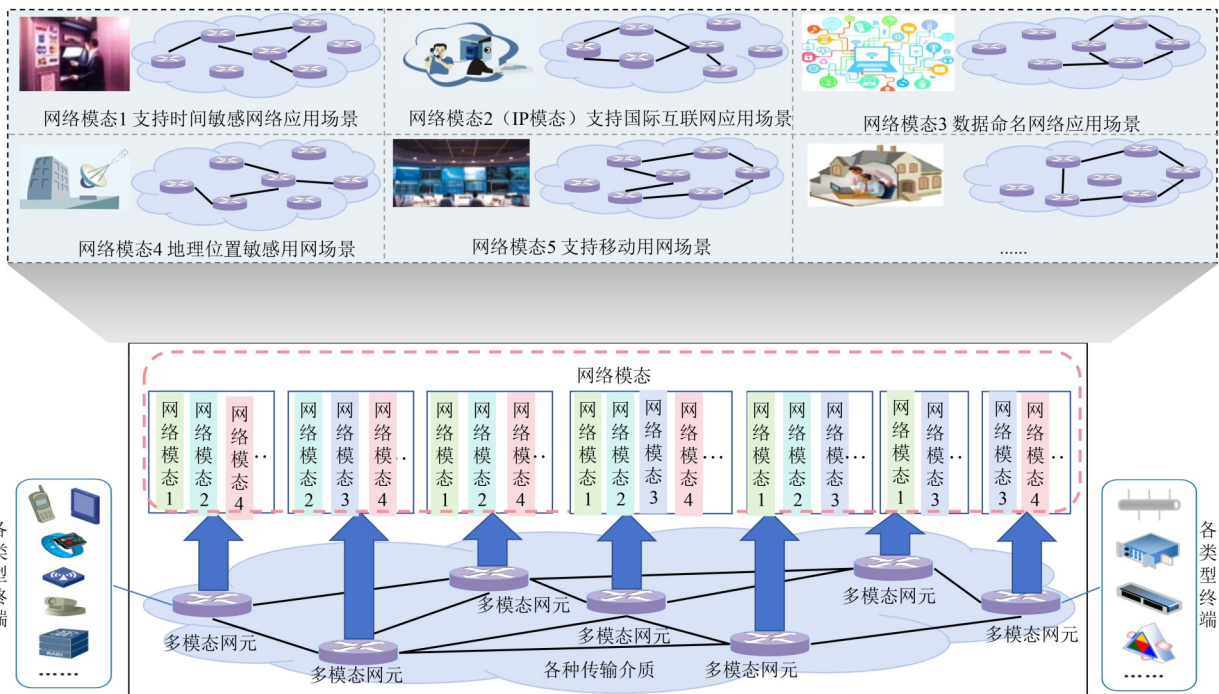


图 1 多模态网络环境

虽然当前学术界存在一些关于多模态网络数据平面优化相关工作<sup>[7-17]</sup>,但是并未解决上述问题.文献<sup>[7~17]</sup>主要从多模态网络环境构造、编译优化等角度来提高多模态网络数据平面的性能,未涉及网络模态的部署优化.因此,仍需进一步研究如何在满足上层业务需求的前提下构造出网络级的网络模态部署方案.然而,在生成网络模态部署方案时,存在以下 3 个挑战:

(1)多模态网元资源有限.多模态网元主要由可编程设备组成.虽然它们能支持同时部署多种网络模态,但是它们的资源是有限的.以搭载 TsingMa.MX 芯片的国产盛科交换机[CTC8180(TsingMa.MX) <https://www.centec.com/silicon/26>]为例,虽然它使用用户自定义字

段(User Defined Field,UDF)支持不同网络模态报文的处理,但每个端口仅能配置 2 条 UDF 规则,难以同时承载大量的网络模态.

(2)保障每种网络模态的连通性.在多模态网络环境中,不同终端可能有不同的网络模态需求.因此,在部署网络模态时,需确保每种网络模态的部署方案具备连通性,以实现终端的正常通信.

(3)确保用户服务质量.多模态网络的上层业务具有差异化的网络需求.例如,工业互联网及远程医疗对网络延迟具有高要求,而视频服务需要更大的网络带宽.因此,在部署网络模态时,需考虑如何在网络资源有限的前提下,保障上层应用的服务质量.

针对上述挑战,本文提出了在多模态网络环境下网络模态共存与优化部署方法,以解决多模态网络数据平面的网络模态部署问题. 具体来说,针对多模态网元资源有限,本文在建模时充分考虑多模态网元资源约束、链路资源约束. 为保障每种网络模态的连通性,本文通过联合优化路由与网络模态部署的方法,使得通信节点对产生的流量路由时经过的多模态网元一定部署了处理该流量所需的网络模态. 为保障用户服务质量,本文考虑了流量转发延迟约束,并将优化目标设定为实现链路的负载均衡来降低转发延迟. 由于建模后的问题是非凸问题,难以直接求解,因此本文将原问题等价转换为0-1整数线性规划问题,并在此基础上设计基于随机舍入的网络模态部署与路由选择算法. 理论分析表明,该算法具有 $O(\log n)$ 的近似比性能,其中 $n$ 是网络中多模态网元的数量. 仿真实验结果表明,所提方案可实现网络模态在数据平面的高效部署,在满足网络资源、流量转发延迟约束的前提下,有效降低13%~22%的链路负载.

## 2 相关工作

当前学术界存在一些关于多模态网络数据平面优化相关工作,主要集中于多模态网络程序编译优化问题、多模态网络环境构造问题和多模态网络节点系统设计问题等.

多模态网络程序编译优化是实现网络高效运行的关键环节,其优化成果能够直接影响网络环境中数据的处理效率和功能的多样性. 针对多模态网络程序编译优化问题,文献[7]提出一种允许在单个物理设备上运行多个相互隔离的网络功能且支持并行流水线的虚拟化可编程数据平面结构VirtP6. VirtP6通过引入并行的多个数据包处理流水线,实现了可编程数据平面的虚拟化,并保证了不同虚拟网络功能之间的资源隔离、流量隔离和访问隔离. 文献[8]通过快速解析、控制流排序和动态阶段映射技术,使得多个P4处理逻辑可动态映射到不同的匹配动作阶段,实现了没有将网络资源进行隔离的数据平面完全虚拟化. 文献[9]提出面向多模态网络环境的网络模态增量式部署机制,降低网络模态部署复杂度. 文献[10]提出一种基于P4的模块化编程架构,通过动态编排为P4编程提供更高的灵活性. 文献[11]提出一种多租户可编程交换机架构,允许不同租户在单个交换机上呈现不同的P4程序. 尽管这些研究在程序编译优化的不同方面取得了进展,但主要集中在提高编程灵活性、降低部署复杂度,以及实现网络功能的隔离与虚拟化等方面. 对于如何在复杂多模态网络环境下,充分考虑不同网络模态的多样化需求,优化网络模态的部署和运行,尚未有深入研究. 然而,这些研究在构建网络环境时,较少考虑网络模态部

署的优化需求. 虽然提供了基础平台和硬件资源支持,但对于如何根据不同网络模态的特点和需求,进行针对性的网络环境配置和资源分配,缺乏深入探讨.

多模态网络环境构造则为网络程序的运行和节点系统的协作提供了基础支撑平台,决定了网络的整体架构和资源配置方式. 针对多模态网络环境构造问题,文献[12, 13]提出一种基于领域专用软硬件协同的多模态网元设计方案和转存算异构软硬件资源分配方法,为构建技术体系与支撑环境分离的多模态网络提供基础平台支撑. 文献[14]在数据平面上整合现场可编程门阵列、图形处理器等异构加速单元,可以为网络提供更好的传输服务. 在网元设备的设计上,微软推出的SONIC<sup>[15]</sup>采用交换机抽象接口,解耦了软硬件的实现细节. 谷歌提出的Stratum系统<sup>[16]</sup>可以配合硬件的可编程特性,实现一个完全可编程的数据平面网元设备. 然而,这些研究在构建网络环境时,较少考虑网络模态部署的优化需求. 虽然提供了基础平台和硬件资源支持,但是并未涉及如何对网络模态部署进行优化.

多模态网络节点系统设计作为网络的基本组成单元,其性能和架构设计影响着整个网络的功能实现和扩展性,为程序编译优化和网络环境构造提供了具体的执行载体. 针对多模态网络节点系统设计问题,文献[17]介绍了一种集成缓存、计算和通信资源的多模态节点通用架构,利用多模态节点的能力和架构,结合多模态的设计原则,开发了一种分层多模态节点之间的协作方法,为多模态网络节点系统架构的设计提供支撑. 但该领域的研究主要侧重于节点自身架构和协作方法的设计,对网络模态部署在节点层面的优化考虑不足. 在实际多模态网络中,不同网络模态对节点资源的需求差异较大,现有研究未能充分考虑如何根据这些差异进行节点资源的合理分配,以满足不同网络模态的服务质量要求.

## 3 系统模型及问题定义

### 3.1 系统模型

#### 3.1.1 网络模型

一个典型的多模态网络架构包含逻辑集中的控制平面和由核心级交换机、接入级交换机、终端、链路组成的数据平面. 控制平面负责数据平面的资源管理、网络模态部署和流量调度等工作. 数据平面根据控制平面的命令在数据平面交换机上部署网络模态并实现流量的转发和路由. 将多模态网络的数据平面建模成一个有向无环图 $G=(V \cup U, E)$ ,其中 $U$ 表示终端集合, $E$ 表示链路集合, $V$ 表示交换机集合,由核心级交换机集合 $V_c$ 和接入级交换机组成集合 $V_a$ 组成,即 $V=(V_c \cup V_a)$ . 设多模态网络中的网络模态集合为 $M$ . 需注意交换机在部署网络模态和配置流量路由消耗的资源

是不同的. 以搭载 TsingMa.MX 芯片的国产盛科交换机为例, 它使用 UDF 实现不同网络模态报文字段的提取. 因此, 它在部署网络模态时, 消耗的是 UDF 规则, 而配置路由主要消耗的是存储流表的三态内容寻址存储器 (Ternary Content Addressable Memory, TCAM) 资源. 本文将交换机  $v$  的资源分为 2 类, 第 1 类是部署网络模态需要的资源, 其容量记为  $C_v^d$ ; 第 2 类是配置流量路由需要的资源, 其容量记为  $C_v^f$ . 链路负责将终端、接入级交换机和核心级交换机连接起来, 将链路  $e \in E$  的带宽容量记为  $C_e$ . 使用  $t_e$  和  $t_v$  分别表示链路  $e \in E$  的传输延迟和交换机  $v \in V$  的处理延迟.

### 3.1.2 流量模型

多模态网络中存在多种网络模态的流量. 将网络模态为  $m \in M$  的流量集合表示为  $\Gamma_m$ , 网络中所有网络模态的流量集合表示为  $\Gamma = \bigcup_{m \in M} \Gamma_m$ . 每一条流  $\gamma \in \Gamma$  可由三元组  $(u_s, u_d, m)$  表示, 其中  $u_s \in U$  表示流  $\gamma$  的源终端,  $u_d \in U$  表示流  $\gamma$  的目的终端,  $m$  表示流  $\gamma$  所属的网络模态. 设流  $\gamma$  的流量大小为  $\theta_\gamma$ , 并使用二元常量  $I_\gamma^m$  表示流  $\gamma$  的网络模态是否为  $m$ . 即当流  $\gamma$  的网络模态为  $m$  时,  $I_\gamma^m = 1$ ; 否则,  $I_\gamma^m = 0$ . 为流  $\gamma$  配置路由时消耗的交换机资源记为  $\beta_\gamma$ . 为方便建模, 每条流  $\gamma$  有一个候选路径集合  $P_\gamma$ , 可通过最短  $k$  路径算法得到该集合. 此外, 为确保流量转发质量, 每条流设有传输延迟阈值. 将流  $\gamma$  的传输延迟阈值记为  $T_\gamma$ . 表 1 总结了本文使用的关键符号.

表 1 关键符号

参数	含义
$V$	交换机集合
$E$	链路集合
$U$	终端集合
$M$	网络模态集合
$\Gamma$	流量集合
$P_\gamma$	流 $\gamma$ 的候选路径集合
$I_\gamma^m$	二元常量, 表示流 $\gamma$ 的网络模态是否为 $m$
$\alpha_m$	在交换机上部署网络模态 $m$ 需要消耗的资源量
$\theta_\gamma$	流 $\gamma$ 的流量大小
$\beta_\gamma$	交换机处理流 $\gamma$ 需要消耗的资源量
$C_e$	链路 $e$ 的带宽容量
$C_v^d$	交换机 $v$ 可供部署网络模态的资源容量
$C_v^f$	交换机 $v$ 可供配置流量路由的资源容量
$t_e$	链路 $e$ 的传输延迟
$t_v$	交换机 $v$ 的处理延迟
$x_v^m$	二元变量, 表示网络模态 $m$ 是否被部署在交换机 $v$ 上
$y_\gamma^p$	二元变量, 表示流 $\gamma$ 是否使用路径 $p \in P_\gamma$ 进行路由

## 3.2 问题定义

### 3.2.1 问题描述

由于网络模态部署与路由互相耦合, 因此在构造网

络模态部署方案时, 需同时确定网络模态的部署和通信终端对之间的路由. 本文将网络模态部署方案构造问题又称为网络模态部署与路由联合优化问题 (Joint optimization of network Modal Deployment and Routing, JMDR). 具体来说, 在给定多模态网络拓扑和终端分布, 以及流量集合的前提下, JMDR 问题需要解决以下 2 个子问题: (1) 在每个交换机上部署哪些网络模态来完成数据包的正确解析与转发; (2) 每条流走哪条路由路径来将数据包转发至相应的目的终端. 本文使用二元变量  $x_v^m$  表示网络模态  $m$  是否被部署在交换机  $v$  上. 若网络模态  $m$  部署在交换机  $v$  上,  $x_v^m = 1$ ; 否则,  $x_v^m = 0$ . 使用二元变量  $y_\gamma^p$  表示流  $\gamma$  是否使用路径  $p \in P_\gamma$  进行路由. 若流  $\gamma$  的路由路径为  $p$ ,  $y_\gamma^p = 1$ ; 否则,  $y_\gamma^p = 0$ . 总而言之, JMDR 问题需要在给定网络拓扑和流量集合下解决上述 2 个子问题, 确定变量  $x_v^m$  与  $y_\gamma^p$  的值, 以完成多模态网中网的构建, 实现流量的高质量转发.

### 3.2.2 约束

在联合优化网络模态部署与路由时, 需考虑以下约束:

(1) 选路约束. 对于任意一条流  $\gamma$  而言, 需为其选择一条路由路径进行转发, 即

$$\sum_{p \in P_\gamma} y_\gamma^p = 1, \forall \gamma \in \Gamma \quad (1)$$

(2) 网络模态部署约束. 若网络模态为  $m$  的流  $\gamma$  选择路径  $p$  作为其转发路径, 那么该路径上的所有交换机需部署网络模态  $m$ . 将路径  $p$  上的交换机集合表示为  $V_p$ , 该约束可以表示为

$$I_\gamma^m \cdot y_\gamma^p \leq x_v^m, \forall m \in M, p \in P_\gamma, v \in V_p \quad (2)$$

(3) 交换机网络模态部署资源约束. 设在交换机上部署网络模态  $m$  需要消耗的资源为  $\alpha_m$ . 在交换机上部署网络模态时, 不应超出其资源容量, 即

$$\sum_{m \in M} x_v^m \cdot \alpha_m \leq C_v^d, \forall v \in V \quad (3)$$

(4) 交换机路由配置资源约束. 在配置路由时, 不应超出交换机路由配置相关的资源容量, 即

$$\sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{p \in P_\gamma} y_\gamma^p \cdot \beta_\gamma \leq C_v^f, \forall v \in V \quad (4)$$

(5) 链路资源约束. 每条链路上经过的总流量大小不应超出该链路的带宽容量, 即

$$\sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{p \in P_\gamma} y_\gamma^p \cdot \theta_\gamma \leq C_e, \forall e \in E \quad (5)$$

(6) 转发延迟约束. 流  $\gamma$  选择的路由路径的转发延迟不应超过该流的转发延迟阈值  $T_\gamma$ , 即

$$\sum_{p \in P_\gamma} y_\gamma^p \cdot \left( \sum_{e \in p} t_e + \sum_{v \in p} t_v \right) \leq T_\gamma, \forall \gamma \in \Gamma \quad (6)$$

### 3.2.3 优化目标

由于链路过载会导致数据包的转发时延, 以及端

到端通信延迟变长,降低用户的服务质量.因此,本文考虑的优化目标是实现链路的负载均衡,即

$$\min \max \left\{ \sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{e \in p: p \in P_\gamma} y_\gamma^p \cdot \theta_\gamma, \forall e \in E \right\} \quad (7)$$

综上所述,JMDR问题可被形式化如下:

$$\min \max \left\{ \sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{e \in p: p \in P_\gamma} y_\gamma^p \cdot \theta_\gamma, \forall e \in E \right\} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{约束: (1) ~ (6)} \\ x_v^m \in \{0, 1\}, \forall v \in V, m \in M \\ y_\gamma^p \in \{0, 1\}, \forall \gamma \in \Gamma, p \in P_\gamma \end{cases}$$

**定理 1** JMDR问题是NP-hard问题.

**证明** 为了证明JMDR问题是NP-hard的,本文给出如下定义.

**定义 1** 并行机调度(Identical Parallel Machines Scheduling, IPMS)<sup>[18]</sup>问题.给定 $m$ 个并行机器和 $n$ 个独立作业,每个作业都将被分配给具有相同处理速度的机器之一.因此,每个作业在所有机器上花费相同的处理时间.该问题的目标是在合适的机器上安排工作,以尽量减少总完成时间.

由于IPMS是NP-hard的,可以通过证明IPMS是JMDR问题的一个特例来证明JMDR问题的难解性.

考虑JMDR问题的一个特例.给定一个如图2所示的网络拓扑结构,有2个接入交换机 $v_0$ 和 $v'_0$ ,以及 $n$ 个核心交换机记为 $v_i, i=1, 2, \dots, n$ .每个接入交换机与 $m$ 个终端相连.与接入交换机 $v_0$ 相连的终端记为 $u_j^i, j=1, 2, \dots, m$ ,与接入交换机 $v'_0$ 相连的终端记为 $u_j^i, j=1, 2, \dots, m$ .将接入交换机 $v_0$ 和 $v'_0$ 及核心交换机 $v_i$ 的网络模态部署资源和路由配置资源设为无穷大.另外,终端和接入交换机之间的链路带宽资源设为无穷大,接入交换机和核心交换机之间的链路带宽容量设为常数 $c_0$ .该JMDR问题实例旨在为网络中的每一条流量选择一条路由路径,并在相应路径的交换机上部署网络模态和配置路由规则,优化目标为实现链路的负载均衡.可见,IPMS问题是JMDR问题的一个特例.由于IPMS问题是NP-hard的,因此JMDR问题也是NP-hard的.证毕.

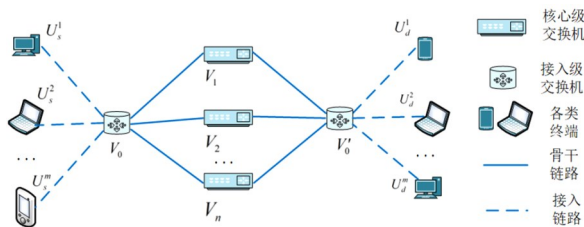


图2 JMDR问题的一个特例

## 4 算法设计

### 4.1 原问题等价转换

由于式(8)定义的JMDR问题在优化目标中出现了最小最大化函数,导致JMDR问题并不是一个整数线性规划问题,增大了求解难度.因此,在设计求解算法前,本文先将原问题等价转换为一个整数线性规划问题.

定义负载均衡因子 $\lambda$ ,其表示链路资源消耗占链路容量的比例.将式(8)定义的PMDR问题转换为

$$\min \lambda \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{约束: (1) ~ (4), (6)} \\ \sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{e \in p: p \in P_\gamma} y_\gamma^p \cdot \theta_\gamma \leq C_e \cdot \lambda, \forall e \in E \\ x_v^m \in \{0, 1\}, \forall v \in V, m \in M \\ y_\gamma^p \in \{0, 1\}, \forall \gamma \in \Gamma, p \in P_\gamma \end{cases}$$

式(9)与式(8)的主要区别在于对优化目标,以及交换机网络模态部署资源约束进行了改写.改写后的式(9)为0-1整数线性规划问题.

### 4.2 RBDR:针对PMDR问题的随机舍入算法

针对PMDR问题,本文设计了一个基于随机舍入的网络模态部署与路由选择算法(Randomized-Base algorithm for network modal Deployment and Routing selection, RBDR),其可在多项式时间内求解式(9)定义的JMDR问题.

RBDR共由3个步骤组成.第1步是对式(9)定义的JMDR问题进行松弛,将变量 $x_v^m$ 和 $y_\gamma^p$ 的取值范围放松为连续区间 $[0, 1]$ ,从而得到线性规划.在放松后,变量 $x_v^m$ 表示网络模态 $m$ 部署在交换机 $v$ 上的概率, $y_\gamma^p$ 表示流 $\gamma$ 选择路径 $p$ 作为其路由路径的概率.松弛后的约束式(9)是一个线性规划,因此可使用线性规划求解器(如Gurobi<sup>[19]</sup>、CPLEX<sup>[20]</sup>等)对其进行求解.

设松弛后式(9)的小数解为 $\hat{x}_v^m$ 和 $\hat{y}_\gamma^p$ ,整数解为 $\hat{x}_v^m$ 和 $\hat{y}_\gamma^p$ .在第2步中,RBDR基于小数解 $\hat{y}_\gamma^p$ 构造松弛前式(9)的整数解 $\hat{y}_\gamma^p$ ,以概率 $\hat{y}_\gamma^p$ 将 $\hat{y}_\gamma^p$ 置为1,以确定路由选择.第3步基于第2步的基础确定整数解 $\hat{x}_v^m$ 的值.设流 $\gamma$ 在步骤2选择路径的交换机集合为 $V_\gamma^p$ .RBDR将流 $\gamma$ 所需的网络模态 $m$ 部署在交换机 $v \in V_\gamma^p$ 上,并将 $\hat{x}_v^m$ 置为1.RBDR的详细过程如算法1所示.

由于RBDR先确定路由再部署网络模态,可能会出现在部署网络模态时已没有足够的资源.因此,本文对RBDR进行了改进.改进的RBDR共由4步组成,前3步与算法1相同.使用 $v'$ 表示过载交换机集合,交换机 $v$ 经过的流量集合表示为 $\Gamma_v$ .针对过载的交换机,RBDR根据 $\hat{x}_v^m$ 的值对 $\Gamma_v$ 中的流进行升序排序.对于 $\Gamma_v$ 中的流,RBDR

**算法 1 网络模态部署与路由选择算法 RBDR**

输入: 网络拓扑结构  $G$ 、流量集合  $\Gamma$  及每条流  $\gamma$  的候选路径集合  $P_\gamma$

输出: 变量  $x_v^m$  和  $y_\gamma^p$  的整数解  $\hat{x}_v^m$  和  $\hat{y}_\gamma^p$

1. 步骤 1: 使用线性规划求解器求解松弛的 JMDR 问题
2. 将变量  $x_v^m$  和  $y_\gamma^p$  的取值范围放松为连续区间  $[0,1]$ , 从而构建松弛的 JMDR 问题;
3. 求解松弛的 JMDR 问题得到小数解  $\{\bar{x}_v^m\}$  和  $\{\bar{y}_\gamma^p\}$
4. 步骤 2: 路由选择
5. 将  $\{\bar{y}_\gamma^p\}$  初始化为 0
6. for  $\gamma \in \Gamma$
7. for  $p \in P_\gamma$
8. 以概率  $\bar{y}_\gamma^p$  将  $\hat{y}_\gamma^p$  置为 1
9. end for
10. end for
11. 步骤 3: 网络模态部署
12. 将  $\{\bar{x}_v^m\}$  初始化为 0
13. for  $\gamma \in \Gamma$
14. 设其在步骤 2 选择的路径上的交换机集合为  $V_\gamma^p$
15. for  $v \in V_\gamma^p$
16. 将流  $\gamma$  所需的网络模态  $m$  部署在交换机  $v$  上
17. 将  $\hat{x}_v^m$  置为 1
18. end for
19. end for

从候选路径集合  $P_\gamma$  中找到一条新的路由路径, 该路径拥有最大  $\hat{y}_\gamma^p$  值, 且满足式(1)~式(6)定义的约束, 并根据新路径更新  $\hat{x}_v^m$  和  $\hat{y}_\gamma^p$ . 重复上述过程直至交换机  $v$  不过载. 本文将改进的 RBDR 命名为完全 RBDR 算法 (Completed RBDR algorithm, CRBDR), 详细过程如算法 2 所示.

## 5 性能分析

为分析 RBDR 的近似性能, 首先给出以下 2 个著名定理.

**定理 2** (切尔诺夫不等式)<sup>[21]</sup> 给定  $n$  个独立的变量  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , 其中  $\forall z_i \in [0, 1]$ , 令  $\mu = \left[ \sum_{i=1}^n z_i \right]$ , 可以得到

$$\Pr \left[ \sum_{i=1}^n z_i \geq (1 + \varepsilon) \cdot \mu \right] \leq e^{-\varepsilon^2 \cdot \mu / (2 + \varepsilon)}, \text{ 其中 } \varepsilon \text{ 是个任意正值.}$$

**定理 3** (布尔不等式)<sup>[22]</sup> 给定  $n$  个事件  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , 每个事件  $A_i$  以  $\Pr(A_i)$  的概率发生. 可以得到  $\Pr(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \leq \sum_{i=1}^n \Pr(A_i)$ .

接下来分析在随机舍入之后, RBDR 会为每条流选择一条路由路径.

**定理 4** 经过随机舍入处理之后, 每条流仅会被分配一条路由路径.

**证明** 流  $\gamma$  有一个候选路径集合  $P_\gamma$ . 其中每条路径

**算法 2 CRBDR**

输入: 网络拓扑结构  $G$ 、流量集合  $\Gamma$  及每条流  $\gamma$  的候选路径集合  $P_\gamma$ 、

$\{\bar{x}_v^m\}$ 、 $\{\bar{y}_\gamma^p\}$ 、 $\{\hat{x}_v^m\}$ 、 $\{\hat{y}_\gamma^p\}$

输出: 调整后的  $\{\hat{x}_v^m\}$  和  $\{\hat{y}_\gamma^p\}$

1. 步骤 1~步骤 3: 与算法 1 相同
2. 步骤 4: 网络模态部署与路由调整
3. 将过载交换机集合  $v'$  初始化为  $\phi$
4. for  $v \in V$
5. 计算交换机  $v$  的网络模态部署资源消耗  $c_v$
6. if  $c_v > C_v^f$
7.  $V' \leftarrow V' \cup \{v\}$
8. end if
9. end for
10. for  $v \in V'$
11. 使用  $\Gamma_v$  表示交换机  $v$  上的流集合
12. 根据  $\bar{x}_v^m$  的值对  $\Gamma_v$  中的流进行升序排序
13. for  $\gamma \in \Gamma_v$
14. 从候选路径集合  $P_\gamma$  中找到一条新的路由路径, 该路径拥有最大  $\hat{y}_\gamma^p$  值, 且满足式(1)~(6)定义的约束
15. 根据新路径更新  $\hat{x}_v^m$  和  $\hat{y}_\gamma^p$
16. if  $c_v < C_v^f$
17. break
18. end if
19. end for
20. end for

被选作路由路径的概率为  $\hat{y}_\gamma^p$ . 因此, 有

$$\Pr[\hat{y}_\gamma^p = 1] = \hat{y}_\gamma^p \quad (10)$$

那么, 候选路径集合  $P_\gamma$  上选路的总概率为

$$\sum_{p \in P_\gamma} \Pr[\hat{y}_\gamma^p = 1] = \sum_{p \in P_\gamma} \hat{y}_\gamma^p = 1 \quad (11)$$

式(11)中, 第 1 个等式和第 2 个等式根据式(10)和式(9)分别成立. 式(11)描述了在经过随机舍入后, 每条流仅会被分配一条路由路径. 证毕.

将所有交换机中最小的网络模态部署资源容量记为  $C_{v,d}^{\min}$ , 最小的路由配置资源容量记为  $C_{v,f}^{\min}$ . 使用  $C_e^{\min}$  表示链路中最小的带宽容量, 使用  $t_\gamma^{\max}$  表示流  $\gamma$  的候选路径中转发延迟最长的时延大小. 定义如下常量:

$$\mu = \min \left\{ \frac{C_{v,d}^{\min}}{\alpha_m}, \frac{C_{v,f}^{\min}}{\beta_\gamma}, \frac{C_e^{\min} \cdot \lambda}{\theta_\gamma}, \frac{\Gamma_\gamma}{t_\gamma^{\max}}, \forall m \in M, \gamma \in \Gamma \right\} \quad (12)$$

下面将在常量  $\mu$  的基础上分析网络模态部署资源消耗及链路带宽负载的性能.

**定理 5** 在 RBDR 得出的解中, 每个交换机上的网络模态部署资源消耗不会超过小数解的  $(3 \log n / \mu + 3)$  倍, 其中  $n$  是交换机的数量.

**证明** RBDR 首先对  $\hat{y}_\gamma^p$  进行舍入得到每条流的选择结果, 然后在所选路径上部署网络模态以满足流量

的正常处理与转发. 由于式(2)的存在且式(9)中的优化目标是最小化 $\lambda$ , 因此在求解式(9)时,  $\tilde{x}_v^m$ 的值会逼近 $\tilde{y}_v^p$ , 由此得出:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_v^m &\approx \tilde{y}_v^p \\ \Pr[\hat{x}_v^m = 1] &\approx \Pr[\hat{y}_v^p = 1] = \tilde{y}_v^p \approx \tilde{x}_v^m \end{aligned} \quad (13)$$

设流 $\gamma$ 在交换机上部署网络模式的资源消耗为 $\phi_m^v$ , 则 $\phi_m^v$ 的期望为

$$\mathbb{E}[\phi_m^v] = \Pr[\hat{x}_v^m = 1] \cdot \alpha_m \approx \Pr[\hat{y}_v^p = 1] \cdot \alpha_m = \tilde{y}_v^p \cdot \alpha_m = \tilde{x}_v^m \cdot \alpha_m \quad (14)$$

然后, 结合式(12)和式(9)中的交换机网络模式部署资源约束, 有

$$\mathbb{E}\left[\sum_{m \in M} \phi_m^v\right] = \sum_{m \in M} \mathbb{E}[\phi_m^v] = \sum_{m \in M} \tilde{x}_v^m \cdot \alpha_m \leq C_v^d \quad (15)$$

根据式(12)定义的常量 $\mu$ , 有

$$\begin{cases} \frac{\phi_m^v \cdot \mu}{C_v^d} \in [0, 1] \\ \mathbb{E}\left[\sum_{m \in M} \frac{\phi_m^v \cdot \mu}{C_v^d}\right] \leq \mu \end{cases} \quad (16)$$

运用定理3, 可得:

$$\Pr\left[\sum_{m \in M} \frac{\phi_m^v \cdot \mu}{C_v^d} \geq (1 + \varepsilon) \cdot \mu\right] \leq e^{-\frac{\varepsilon^2 \cdot \mu}{2 + \varepsilon}} \quad (17)$$

其中,  $\varepsilon$ 是一个任意小的正数. 假设:

$$\Pr\left[\sum_{m \in M} \frac{\phi_m^v \cdot \mu}{C_v^d} \geq (1 + \varepsilon) \cdot \mu\right] \leq e^{-\frac{\varepsilon^2 \cdot \mu}{2 + \varepsilon}} \leq \frac{\rho}{n} \quad (18)$$

其中,  $\rho$ 是一个和网络规模有关的变量, 可使用交换机数量相关的函数来设置 $\rho$ 的值. 当网络规模增大时 $\rho$ 的值趋近于0. 通过求解式(18)中的不等式, 并设 $\rho = 1/n^2$ ,  $n$ 是网络中交换机的数量, 可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon &\geq \frac{\log \frac{n}{\rho} + \sqrt{\log^2 \frac{n}{\rho} + 8\mu \cdot \log \frac{n}{\rho}}}{2\mu} \\ \Rightarrow \varepsilon &\geq \frac{3 \log n}{\mu} + 2, \quad n \geq 2 \end{aligned} \quad (19)$$

在式(18)的基础上应用定理3, 得:

$$\begin{aligned} \Pr\left[\bigcup_{v \in V} \sum_{m \in M} \frac{\phi_m^v \cdot \mu}{C_v^d} \geq (1 + \varepsilon)\right] &\leq \sum_{v \in V} \Pr\left[\sum_{m \in M} \frac{\phi_m^v \cdot \mu}{C_v^d} \geq (1 + \varepsilon)\right] \\ &\leq |V| \cdot \frac{1}{n^3} = \frac{1}{n^2}, \\ \varepsilon &\geq \frac{3 \log n}{\mu} + 2, \quad n \geq 2 \end{aligned} \quad (20)$$

根据式(20)可知 $1 + \varepsilon = 3 \log n / \mu + 3$ , 这意味着在随机舍入处理之后, 每个交换机上的网络模式部署资源

消耗不会超过小数解的 $(1 + \varepsilon = 3 \log n / \mu + 3)$ 倍. 证毕.

#### 定理6 RBDR

能够确保每条链路的负载不会超过小数解的 $(4 \log n / \mu + 3)$ 倍, 其中 $n$ 是交换机的数量. 即对于链路容量约束, RBDR能取得 $(4 \log n / \mu + 3)$ 的近似比.

**证明** RBDR的第一步会得到松弛后JMDR问题的小数解 $\tilde{y}_v^p$ 和最优结果 $\tilde{\lambda}$ . 通过随机舍入方法, 每条流 $\gamma$ 仅会在候选路径集合 $p_\gamma$ 中选取一条路径进行路由. 因此, 流 $\gamma$ 在链路 $e$ 上产生的负载可被定义为随机变量 $\omega_{e,\gamma}$ :

$$\omega_{e,\gamma} = \begin{cases} \theta_\gamma, & \text{概率为 } \sum_{e \in p_\gamma} \tilde{y}_v^p \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (21)$$

根据定义, 随机变量 $\omega_{e,\gamma}, \gamma \in \Gamma$ 是互相独立的. 链路 $e$ 上的期望为

$$\mathbb{E}\left[\sum_{\gamma \in \Gamma} \omega_{e,\gamma}\right] = \sum_{\gamma \in \Gamma} \mathbb{E}[\omega_{e,\gamma}] = \sum_{\gamma \in \Gamma} \sum_{e \in p_\gamma} \tilde{y}_v^p \cdot \theta_\gamma \leq \tilde{\lambda} \cdot C_e \quad (22)$$

结合式(22)与常量 $\mu$ 的定义, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\omega_{e,\gamma} \cdot \mu}{\tilde{\lambda} \cdot C_e} \in [0, 1] \\ \mathbb{E}\left[\sum_{\gamma \in \Gamma} \frac{\omega_{e,\gamma} \cdot \mu}{\tilde{\lambda} \cdot C_e}\right] \leq \mu \end{cases} \quad (23)$$

应用定理2的切尔诺夫不等式, 假设 $\varepsilon$ 是一个任意小的正数, 有

$$\Pr\left[\sum_{\gamma \in \Gamma} \frac{\omega_{e,\gamma} \cdot \mu}{\tilde{\lambda} \cdot C_e} \geq (1 + \varepsilon) \mu\right] \leq e^{-(\varepsilon^2 \cdot \mu) / (2 + \varepsilon)} \quad (24)$$

假设如下不等式成立:

$$\Pr\left[\sum_{\gamma \in \Gamma} \frac{\omega_{e,\gamma} \cdot \mu}{\tilde{\lambda} \cdot C_e} \geq (1 + \varepsilon) \mu\right] \leq e^{-(\varepsilon^2 \cdot \mu) / (2 + \varepsilon)} \leq \frac{\rho}{n^2} \quad (25)$$

其中,  $\rho$ 已在定理5的证明过程中定义. 通过求解式(25)中的不等式, 并设 $\rho = 1/n^2$ , 可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon &\geq \frac{\log n^2}{\rho} + \sqrt{\log^2 \frac{n^2}{\rho} + 8\mu \cdot \log \frac{n^2}{\rho}} \\ &\geq \frac{4 \log n}{\mu} + 2, \quad n \geq 2 \end{aligned} \quad (26)$$

最后运用定理3, 有

$$\begin{aligned} \Pr\left[\bigcup_{e \in E} \sum_{\gamma \in \Gamma} \frac{\omega_{e,\gamma}}{\tilde{\lambda} \cdot C_e} \geq (1 + \varepsilon)\right] &\leq \sum_{e \in E} \Pr\left[\sum_{\gamma \in \Gamma} \frac{\omega_{e,\gamma}}{\tilde{\lambda} \cdot C_e} \geq (1 + \varepsilon)\right] \\ &\leq n^2 \cdot \frac{1}{n^4} = \frac{1}{n^2}, \quad \varepsilon \geq \frac{4 \log n}{\mu} + 2 \end{aligned} \quad (27)$$

这意味着在随机舍入处理之后,每条链路的负载不会超过小数解的 $(1+\varepsilon=4\log n/\mu+3)$ 倍.证毕.

**定理 7** 在 RBDR 得出的解中,每个交换机上的路由配置资源消耗不会超过小数解的 $(3\log n/\mu+3)$ 倍,路由延迟也不会超过小数解的 $(3\log n/\mu+3)$ 倍.

由于定理 7 的证明过程与定理 5 和定理 6 相似,所以在此省略定理 7 的证明.

## 6 性能评估

在实验部分,本文采用 CRBDR 与其他算法进行对比.实验结论总结如下:

(1)CRBDR 在不同流量情况下的链路负载情况皆优于对比算法.例如,在 8 000 条流的情况下,链路负载因子相较于贪心部署算法(Greedy Deployment Algorithm, GDA)降低约 17.56%,相较于基于随机最短路径部署算法(Deployment Algorithm based on randomized Shortest Path, DASP)降低约 20.97%.

(2)CRBDR 可确保链路负载因子为 0.7 时链路负载比累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)达到 100%.而 GDA 仅达到 90.625%,DASP 仅有 84.37%.这表明 CRBDR 具有出色的链路负载均衡能力,能够将链路负载保持在较低水平.

(3)在 3~6 种不同网络模态中进行部署时,本文提出 CRBDR 的链路负载比能够始终维持在 0.7~0.75,而 GDA 通常 0.8~0.87,而 DASP 一直接近或超过 0.9.相较于其他 2 种算法,本文提出的 CRBDR 在应对在不同网络模态部署情况和流量条件下具有更好的负载均衡能力.

### 6.1 实验设置

本文算法程序使用 Python 3.8 进行编写,实验运行于配置 Intel Core i9-14900K 处理器和 128 GB 内存的服务器上,并配备了 2 块 NVIDIA GeForce RTX 4090 显卡.实验在 ARPANet<sup>[23]</sup>网络拓扑上进行,该拓扑包括 20 个交换机且每个交换机分别连接 10 个终端.

在多模态网络环境研究领域,经过广泛且深入的调研,发现目前尚无专门针对网络模态部署优化的相关论文(详见第 2 节).鉴于此,为了全面且有效地验证所提算法的有效性与高效性,本文在现有被广泛使用的路由协议基础之上进行了合理修改,从而构建出对比算法,即 GDA 和 DASP,并与本文算法展开对比分析.其中,GDA 是基于开放最短路径协议(Open Shortest Path First, OSPF)<sup>[24]</sup>协议进行改进的.GDA 首先在网络拓扑的终端中随机生成 1 个源节点与目的节点,并在它们之间生成 1 条流,然后使用 1 条能够满足模态部署资源约束的路径进行路由,并在路径上部署相应模态.而 DASP 则是基于等价多路径协议(Equal-Cost Multi-Path, ECMP)<sup>[25]</sup>改进而来,首先在源节点与目的节点生

成 1 条流,然后使用最短  $k$  路径算法计算出源节点至目的节点的 5 条最短候选路径列表,最后从中随机选择 1 条流经过的最短路径进行部署网络模态.

本文使用链路负载因子(Link Load Ratio, LLR)作为主要的性能指标.在给定所有流量需求的情况下,测量每条链路  $e \in E$  上的流量负载  $l_e$ ,其中  $C_e$  表示链路  $e$  的带宽容量.链路负载比定义如下:

$$\text{LLR} = \max \left\{ \frac{l_e}{C_e}, e \in E \right\} \quad (28)$$

实验设置方面,本文默认共部署 6 种网络模态,包括 IPv4 模态、IPv6 模态、工控标识模态、地理标识模态、命名数据标识模态、身份标识模态.在生成流时,每条流会随机选择一种网络模态.此外,每条流的源终端节点和目的终端节点在终端集合中随机生成.每条流的流量大小根据 2-8 原则生成<sup>[26]</sup>,即 20% 的流为大象流,80% 的流为老鼠流.和文献[17]相同,本文将链路处理延迟设为 0.1~0.5  $\mu\text{s}$ ,交换机的处理延迟设为 1  $\mu\text{s}$ ,链路容量设为 100 Gbps,并默认设最大传输延迟阈值为 0.01 s,用以评估网络在不同负载条件下的性能表现.

### 6.2 实验结果

本文对流数量从 2 000~8 000 条的不同规模进行多次实验,以观察流的数量如何影响网络拓扑中的路由性能.实验结果如图 3 所示,随着流量数量的增加,3 种算法的链路负载比都呈现出上升的趋势,表明随着流量的增加,网络的负载压力也在逐渐增大.然而,CRBDR 在不同流量下的链路负载比表现明显优于 GDA 和 DASP.特别是在流量较高时,CRBDR 的链路负载比显著低于其他 2 种算法,例如,在 2 000~4 000 条时流时,3 种算法的链路负载比都能维持在一个相对平稳的状态,在流的数量逐渐增加到 6 000 条流以后,GDA 和 DASP 仍维持相对均匀的增长,这部分得益于最短  $k$  路径算法在路径选择上的初步优化.而本文提出的 CRBDR 在 6 000 条以后的链路负载比明显低于其他 2 种对比算法,与 GDA 和 DASP 相比,分别降低约 17.56% 和 20.97%,这表明 CRBDR 在负载均衡方面有明显的优势.

本文还分析了在 8 000 条流的条件下链路负载的 CDF 表现.实验结果如图 4 所示,CRBDR 能够在较低负载区间内有效地分配大部分链路,使其在 40% 链路负载比时 CDF 达到 40.625%,远优于 DASP 的 21.875%,虽然在这个区间低于 GDA,但是 CRBDR 在链路负载为 70% 时 CDF 达到 100%,意味着在 CRBDR 中所有链路的负载全部控制在 70% 以下,表现出出色的负载均衡能力.而 GDA 在链路负载因子为 90% 时 CDF 才达到 100%,这说明 GDA 中存在链路负载为 80%~90%,高于本文所提算法的链路负载.

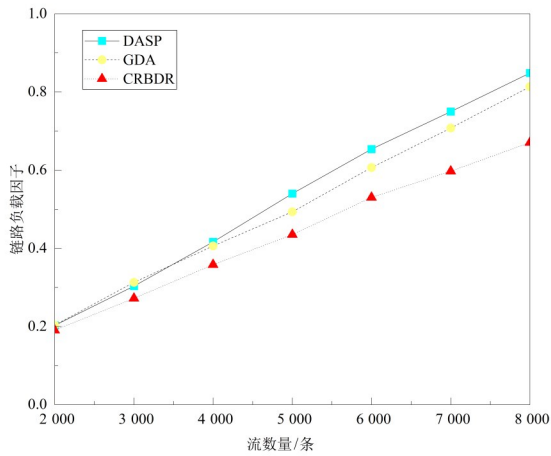


图3 链路负载因子 vs 流数量

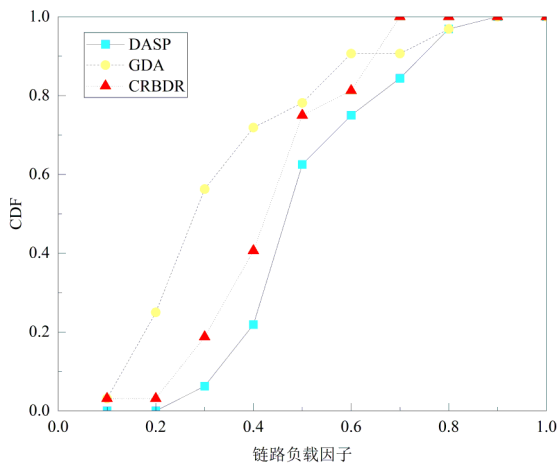


图4 CDF vs 链路负载因子

评估不同算法在不同数量网络模式下的链路负载比,可以验证算法在不同网络配置下的性能表现. 实验结果如图5所示,在8000条流下分别使用3种算法在网络拓扑中分别部署3~6种不同网络模式,其中6种网络模式时为IPv4模式、IPv6模式、工控标识模式、地理标识模式、命名数据标识模式、身份标识模式,不同网络模式数量的实验从后往前依次递减,3种网络模式的实验时网络模式为IPv4模式、IPv6模式、工控标识模式. 实验结果可以看出,CRBDR在各种网络条件下均能显著降低链路负载比,表明其在不同网络拓扑和流量条件下具有更好的负载均衡能力. DASP始终最高,接近或超过0.90. 这表明DASP在网络流量分配时,未能有效地均衡负载,导致部分链路承受了较高的负载. 这种情况可能导致网络中部分链路过载,从而降低整体网络性能. 而GDA在所有模式下表现出中等水平,通常介于0.80~0.87. 虽然GDA在一定程度上改善了负载均衡,但仍然存在较高的链路负载比,这表明GDA仍然可能导致局部的链路过载,未能充分优化网络资源

的使用. CRBDR通常在0.70~0.75. 相比于DASP和GDA, CRBDR显著降低了链路负载比,显示出更好的负载均衡能力,CRBDR通过更有效的流量分配,避免了链路过载,提高了网络的整体性能和稳定性. 因此可得出结论,CRBDR在不同网络模式下均表现出最优的负载均衡能力,相比于DASP,CRBDR能够将链路负载比平均降低18%~22%. 相比GDA,CRBDR能够降低13%~18%的链路负载比.

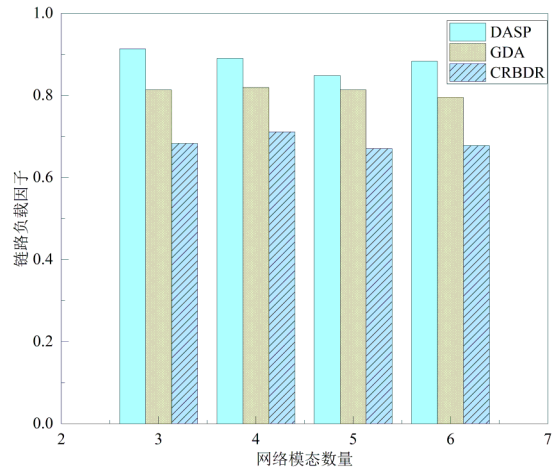


图5 链路负载因子 vs 网络模式数量

此外,本文对3种算法的运行时间性能进行了详细分析,实验结果如图6所示. 随着网络流量从2000条逐渐增至8000条,各算法的计算时间均呈现逐步上升趋势. 在对比中发现,DASP在运行时间上具有显著优势,但这并不直接反映其在链路负载方面表现同样出色. GDA展示了中等程度的时间效率,而CRBDR虽然运行时间略高,但是在可接受范围内. 尤其是在离线场景中,整个网络级别的模式部署方案对于秒级的部署时间感知强度并不大. 因此,CRBDR在链路负载上表现出明显的优势.

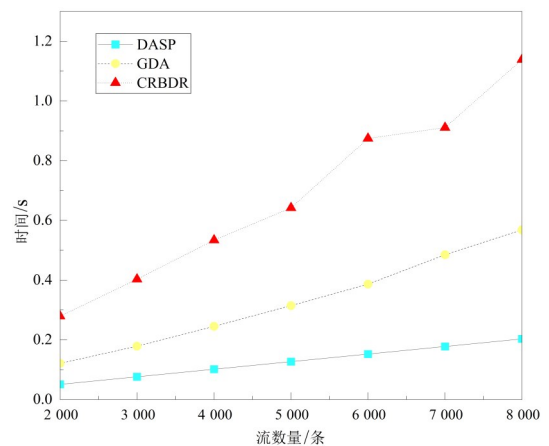


图6 运行时间 vs 流数量

## 7 结论

本文针对多模态网络环境中的网络模态共存与优化部署问题,提出了一种针对 PMDR 问题的随机舍入算法.通过大量实验验证,详细分析不同算法在处理 2 000~8 000 条流量网络中的表现,验证了 CRBDR 在负载均衡方面的显著优势.实验结果显示,RBDR 在链路负载比上相较于 DASP 和 GDA 降低了 13%~22%,能显著降低链路负载比,有效避免链路过载,从而提高网络的整体性能和稳定性.

### 参考文献

- [1] MISHRA S, JAIN V K, GYODA K, et al. An efficient content replacement policy to retain essential content in information-centric networking based Internet of Things network[J]. *Ad Hoc Networks*, 2024, 155: 103389.
- [2] RAHMAN A, HASAN K, KUNDU D, et al. On the ICN-IoT with federated learning integration of communication: Concepts, security-privacy issues, applications, and future perspectives[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2023, 138: 61-88.
- [3] RAYCHAUDHURI D, NAGARAJA K, VENKATARAMANI A. MobilityFirst[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2012, 16(3): 2-13.
- [4] 崔子熙, 田乐, 崔鹏帅, 等. 支持增量式编程的多模态网络环境[J]. *电子学报*, 2024, 52(4): 1230-1238.  
CUI Z X, TIAN L, CUI P S, et al. Enabling incremental programming in PINet environment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(4): 1230-1238. (in Chinese)
- [5] 胡宇翔, 崔鹏帅, 田乐, 等. 多模态网络环境研究进展[J]. *中国基础科学*, 2024, 26(3): 1-8.  
HU Y X, CUI P S, TIAN L, et al. Research progress on polymorphic network environment[J]. *China Basic Science*, 2024, 26(3): 1-8. (in Chinese)
- [6] WU J X, LI J F, SUN P H, et al. Theoretical framework for a polymorphic network environment[J]. *Engineering*, 2024, 10(8): 222-234.
- [7] 李子勇, 胡宇翔, 田乐, 等. 支持多个网络功能共存的可编程数据平面虚拟化[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(10): 3667-3675.  
LI Z Y, HU Y X, TIAN L, et al. Virtualization of the programmable data plane for supporting coexistence of multiple network functions[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(10): 3667-3675. (in Chinese)
- [8] ZHANG C, BI J, ZHOU Y, et al. HyperVDP: High-performance virtualization of the programmable data plane[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(3): 556-569.
- [9] 李炯, 胡宇翔, 崔鹏帅, 等. 面向多模态网络环境的网络模态增量式部署机制研究[J]. *电信科学*, 2023, 39(6): 33-43.  
LI J, HU Y X, CUI P S, et al. Research on incremental deployment mechanism of network modality for polymorphic network environment[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(6): 33-43. (in Chinese)
- [10] ZHOU Y, BI J. ClickP4: Towards modular programming of P4[C]//*Proceedings of the SIGCOMM Posters and Demos*. New York: ACM, 2017: 100-102.
- [11] STOYANOV R, ZILBERMAN N. MTPSA: Multi-tenant programmable switches[C]//*Proceedings of the 3rd P4 Workshop in Europe*. New York: ACM, 2020: 43-48.
- [12] 胡宇翔, 崔子熙, 李子勇, 等. 基于领域专用软硬件协同的多模态网络环境构造技术[J]. *通信学报*, 2022, 43(4): 3-13.  
HU Y X, CUI Z X, LI Z Y, et al. Construction technologies of polymorphic network environment based on code-sign of domain-specific software/hardware[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(4): 3-13. (in Chinese)
- [13] 董永吉, 胡宇翔, 崔鹏帅. 存转算一体的多模态网络共性平台技术研究[J]. *中兴通讯技术*, 2022, 28(1): 16-20, 74.  
DONG Y J, HU Y X, CUI P S. PINet data plane platform technology for storage, forwarding and computing integration[J]. *ZTE Technology Journal*, 2022, 28(1): 16-20, 74. (in Chinese)
- [14] CAI T, CHEN W H, ZHANG J T, et al. SmartChain: A dynamic and self-adaptive sharding framework for IoT blockchain[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2024, 17(2): 674-688.
- [15] SCANO D, GIORGETTI A, SGAMBELLURI A, et al. Hierarchical control of SONiC-based packet-optical nodes encompassing coherent pluggable modules[C]//*2021 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. IEEE, 2021: 1-3.
- [16] CONNOR O B, GHAFKARHAH A, PUDELKO M, et al. Enabling the era of next generation SDN[EB/OL]. (2021-12-10)[2025-04-27]. <https://opennetworking.org/stratum>.
- [17] YUAN S Z, TAN X B, WU J S, et al. A universal architecture and collaborative approach for polymorphic smart network nodes[C]//*2023 International Conference on Ubiquitous Communication (Ucom)*. Piscataway: IEEE, 2023: 426-431.
- [18] AKYOL OZER E, SARAC T. MIP models and a matheuristic algorithm for an identical parallel machine scheduling problem under multiple copies of shared resources constraints[J]. *TOP*, 2019, 27(1): 94-124.

- [19] ACHTERBERG T. What's new in Gurobi 9.0[J]. Webinar Talk Url, 2019, 5(9): 97-113.
- [20] KIA R, SHAHNAZARI-SHAHREZAEI P, ZABIHI S. Solving a multi-objective mathematical model for a Multi-Skilled Project Scheduling Problem by CPLEX solver[C]// 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Piscataway: IEEE, 2016: 1220-1224.
- [21] DIKSTEIN Y, HOPKINS M. Chernoff bounds and reverse hypercontractivity on HDX[C]//2024 IEEE 65th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS). Piscataway: IEEE, 2024: 870-919.
- [22] SENETA E. On the history of the strong law of large numbers and boole's inequality[J]. Historia Mathematica, 1992, 19(1): 24-39.
- [23] DING W L, XU H. Dynamic learning-based link restoration in traffic engineering with archie[C]//IEEE INFOCOM 2024 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2024: 2428-2437.
- [24] PIÓRO M, SZENTESI Á, HARMATOS J, et al. On open shortest path first related network optimisation problems[J]. Performance Evaluation, 2002, 48(1/2/3/4): 201-223.
- [25] HOPPS C E. Analysis of an equal-cost multi-path algorithm[J]. RFC, 2000, 2992: 1-8.
- [26] TU H Q, ZHAO G M, XU H L, et al. A robustness-aware real-time SFC routing update scheme in multi-tenant clouds[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2022, 30(3): 1230-1244.

### 作者简介



**涂化清** 女, 1995年生. 博士, 现为浙江实验室博士后, 助理研究员. 主要研究方向为软件定义网络、可编程数据平面、多模态网络等.  
E-mail: 18716038951@163.com



**李传煌** 男, 1980年生. 博士, 现为浙江工商大学教授、硕士生导师. 主要研究方向为软件定义网络、开放可编程网络、系统性能预测和分析模型、算力网络、智慧网络等. 中国电子学会会员编号: E190024269M.



**廖君虎** 男, 1998年生. 现为浙江工商大学硕士研究生. 主要研究方向为软件定义网络、移动网络优先等.



**张汝云** 男, 1973年生. 博士, 现为浙江实验室研究员. 主要研究方向为多模态网络技术、工业互联网和网络通信安全.



**朱俊** 男, 1981年生. 博士, 现为浙江实验室工程专家、高级工程师. 主要研究方向为新型网络体系结构、软件定义网络、网络资源管理、网络协议设计优化等.  
E-mail: zhu\_j@aliyun.com



**邬江兴** 男, 1953年生. 中国工程院院士, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授. 主要研究方向为网络新技术、网络空间内生安全.



**邹涛** 男, 1974年生. 博士, 现为浙江实验室研究员. 主要研究方向为多模态网络技术和新型网络体系架构.