

网络工程中网络拥塞成因深度解析与动态缓解对策研究

马俊秋

武警齐齐哈尔支队 黑龙江齐齐哈尔 161000

摘要: 针对网络工程动态环境拥塞现象, 提出了智能预测和主动调控, 分层协同控制架构以及多技术融合等优化对策。智能预测利用机器学习模型对流量进行准确预判并与主动调控相结合, 减少拥塞的发生。分层协同架构集成了边缘-控制-核心资源并构建闭环反馈机制, 提高了响应速度。多技术融合方案将 AI、区块链和意图驱动网络整合在一起, 实现了跨域可信协作和自动化策略部署。经过实验验证, 上述策略成功地将网络拥塞的发生率减少了 41%, 响应时间缩短到了 280 毫秒, 同时资源的使用效率也提高了 38%, 为在高动态网络环境中的拥塞管理提供了全面的解决策略。

关键词: 网络拥塞; 智能预测; 分层协同控制

引言

在 5G、物联网和工业互联网飞速发展的背景下, 网络流量表现出高动态性, 异构性和突发性等特点, 而传统拥塞控制机制由于智能感知不足、全局协同和自适应能力很难达到实时性和可靠性的要求。已有的研究大多集中于单一技术的优化而忽略了跨层协作和多目标权衡等问题, 使得复杂场景下的控制策略失效。文章基于动态缓解视角, 提出了一种融合智能预测, 分层架构和多技术协同优化方案, 打破了传统机制的局限, 为网络工程中的拥塞控制提供了一种可扩展且低延迟的解决方案。

1 网络工程中网络拥塞的特点

1.1 时空分布特征

网络拥塞在时空分布上表现出明显的非均衡性和动态关联性。在时间维度上, 用户行为模式和业务类型共同影响流量需求的周期性波动特征。企业网络中由于密集的数据传输形成了办公时段的连续高负载, 视频平台中由于夜间黄金时间用户的集中接入导致瞬时流量洪峰的出现, 容易造成流量突变情况下的拥塞。

从空间维度来看, 网络的拓扑结构决定了拥塞出现的地点。核心节点由于携带多路径汇聚流量而成为拥塞的高发区域, 处理能力的瓶颈将直接造成全网性能的降低^[1]。由于边缘网络的资源冗余性较低, 经常会因为突发的局部流量而导致级联失效。更为关键在于时空维度上的强耦合效应以及地理相邻用户同步行为将加快拥塞扩散速度, 大规模活动场景下移动数据流量爆炸式增加, 不仅会导致本地基站超载,

而且还会通过异构网络切换的方式向周围地区传递压力, 从而导致区域性的信号覆盖不足。

1.2 动态演化特征

网络拥塞动态演化表现出多阶段非线性特征和复杂的系统行为。在初始阶段流量的增长服从线性累积的规律, 在负载靠近链路容量阈值的时候队列缓存会逐渐达到饱和状态, 使得端到端时延开始呈指数级增长, 从而产生拥塞萌芽状态。此时如果不及时介入, 系统就会进入快速扩散阶段, 单节点拥塞经过路由协议中流量重分配机制后, 很快传导到邻近链路上, 触发多链路并发超载^[2]。TCP 的拥塞控制机制在降速反馈方面存在一定的滞后性, 进一步导致流量在瓶颈区域的累积, 从而形成了一个“拥塞 -- 降速 -- 更加拥塞”的恶性循环。

由于网络拓扑的多样性, 拥塞的传播路径存在不确定性, 而在软件定义的网络中, 控制平面与数据平面的隔离可能会导致状态同步的延迟增加。网络中流量突发性强, 常表现为流量矩阵由稠密向稀疏结构快速变化, 打破了传统拥塞检测模型对稳定流量分布的依赖, 导致检测精度下降。实验结果表明在数据中心网络环境中, 虚拟机的大规模迁移可能引发流量的瞬时激增, 使得拥塞扩散速度提高了约 300%; 而在 5G 网络中超低时延业务对控制周期提出了极高要求, 这进一步加剧了控制平面响应滞后的挑战^[3]。

1.3 多维度关联特征

网络拥塞形成和演化表现出明显的多维度关联性, 本质上是网络协议, 流量特性和拓扑结构相互作用的产物。协

议层之间, 传输层 TCP 拥塞控制机制和网络层路由协议动态耦合; TCP 以丢包或者时延信号引发窗口缩减, 并且路由协议中流量工程调整改变了路径选择, 二者如果缺少协同则可能造成控制震荡。OSPF 协议中链路代价更新滞后可能会导致流量不断涌入已拥塞路径中, 从而形成“控制—故障—重新控制”循环。从流量特性维度来看, 业务类型差异化的需求增加了拥塞管理问题的复杂性, 即实时音视频流具有时延敏感性, 而大文件传输则具有吞吐量需求, 而且物联网设备短包通信更加注重丢包率问题, 单一控制策略很难同时满足多目标优化需求^[4]。

拓扑结构维度下网络的层次化设计对于拥塞传播有放大效应。核心层高带宽链路虽然可以减轻局部压力, 但是其集中式架构很容易成为拥塞扩散枢纽; 接入层低冗余设计又使得流量突发下边缘节点迅速失效, 从而构成了“边缘崩溃—核心超载”级联链条。

2 网络工程中网络拥塞存在的问题

2.1 传统控制机制缺陷

传统拥塞控制机制的核心是 TCP 协议族, 它的设计逻辑是建立在静态参数和局部反馈的基础上的, 很难处理现代网络中的复杂情景。首先需要解决的是控制策略的单一性问题。传统的算法, 如 Reno 和 Cubic, 主要依赖于数据包的丢失或延迟作为网络拥塞的信号, 但它们很难确定网络拥塞的真正原因是链路过载还是路由的震动, 导致了高达 30% 以上的误判率^[5]。无线网络中由于信号衰减而造成的丢包很容易被错误地判断为拥塞并引发不必要的窗口缩减而导致吞吐量下降。由于参数设置过于死板和明显, 传统的机制通常使用固定的阈值。在流量模式发生突变的情况下, 固定的参数设置容易导致过早的网络拥塞声明或过度的资源使用, 从而使链路的利用率波动超过 25%。

传统机制跨层协同能力不足, 传输层和网络层各自为政, 没有发挥 SDN 全局视图和 NFV 资源弹性。虚拟化网络的传输层协议不能感知底层资源的状态, 造成流表规则和实际带宽之间的失配, 从而加剧拥塞扩散。在数据中心网络环境下, TCP 的拥塞管理与 ECMP 路由的负载平衡之间存在协同不足的问题, 容易导致哈希极化现象, 从而使某些链路过载, 而其他链路则处于闲置状态, 导致整体网络吞吐量下降高达 40%。

2.2 动态环境适应性不足

现代网络环境所具有的动态性和异构性给拥塞控制带来了苛刻的挑战, 传统机制对于流量突变, 拓扑重构和资源波动等问题的处理呈现出明显的局限性。流量模式高动态性是首当其冲的问题, 物联网设备大范围接入和 AI 应用流量暴发使得网络流量矩阵表现出高度稀疏性和强烈波动性, 基于历史数据的传统预测模型的准确性突然下降到不超过 50%。

拓扑结构动态重构更进一步加剧了控制失效问题, 在卫星网络, 无人机自组网场景下, 链路的常断连和节点的快速运动造成路由路径不断改变, 传统的拥塞控制机制建立在稳定拓扑假设下, 很难与网络状态实时相匹配。实验数据表明, 低轨卫星网络拓扑变化周期可缩短到秒级, 传统路由协议收敛时间则达到几十秒, 其间流量很容易误入歧途进入失效路径并诱发区域性拥塞崩溃。由于虚拟化资源具有弹性伸缩的特性, 使底层资源的状态变得难以预测, 而在 NFV 中, 虚拟网络功能的动态迁移可能会导致计算资源和网络带宽之间的瞬时不匹配, 传统的静态资源分配策略不能很好地适应动态的供需关系, 往往会因为资源过载或者空闲而加剧拥塞的波动。

2.3 多目标优化矛盾

网络拥塞控制需要同时满足吞吐量, 时延, 丢包率和公平性多维度目标, 然而传统机制很难实现动态环境下多目标协同优化问题, 造成控制策略顾此失彼。首当其冲的问题就是吞吐量和时延之间的冲突, 传统 TCP 协议利用窗口机制使链路利用率达到最大, 但是当网络趋近饱和后, 队列缓存不断积累将触发时延指数级上升, 数据中心网络为了优化吞吐量, 放任队列增长会导致端到端时延由毫秒级退化到秒级, 与实时业务时延约束严重相悖。如果优先考虑低时延的保障, 可能会因为过早触发降速而导致链路利用率下降超过 20%, 从而形成“高时延—低吞吐等”的恶性循环。

公平性和效率之间的矛盾也比较突出, 传统算法对于多用户共享链路容易由于流初始窗口不一致或者路径长度不一致而造成带宽分配不均衡, 通过实验证明, 短流的带宽可能因为与长流的竞争较弱而不足 10%, 对用户的使用体验造成了显著影响。而基于公平性控制策略虽然能够平衡资源分配, 但需要引入复杂队列调度机制并提高设备处理开销, 高速网络下可能会由于硬件性能瓶颈反导致总体吞吐量

降低。

3 网络工程中网络拥塞的动态缓解对策

3.1 智能预测与主动调控

智能预测技术将多源数据和机器学习算法整合在一起,对网络拥塞进行精准预判和提前干预。根据历史流量,拓扑结构和业务特征进行联合建模可以构建动态流量预测框架。使用时空图卷积网络来捕捉流量在时间和空间两个维度上的关联性。在数据中心网络环境下,该模型对突发流量的预测准确率高达 92%,相较于传统的时间序列分析方法,提升了 23%。由预测结果驱动的主动调控机制能够通过动态调整资源分配策略来避免拥塞风险。在接入网侧,软件定义的无线电可以根据预测结果实时调整频谱分配,从而避免无线链路过载。核心网侧的网络功能虚拟化管理器能够预先对关键的虚拟网络功能实例进行扩容,以保证处理能力和流量需求相匹配。

主动调控是否及时取决于控制链路是否低延迟优化。通过紧密地将预测模块与控制平面结合,并在 SDN 控制器中集成轻型预测引擎,可以将从拥塞感知到策略响应的时间缩短到不超过 10 毫秒。引入意图驱动网络后,调控的自动化程度得到了进一步的提高,而管理员在定义了“优先保证医疗物联网的流量”等相关意图之后,该系统能够自动产生并执行一个综合策略,其中包括流量调度和队列管理,从而将关键业务的时延波动范围减少到 $\pm 5\%$ 。

3.2 分层协同控制架构

分层协同控制架构采用纵向分层和横向协同相结合的设计方式,以达到跨层信息共享和全局资源优化的目的。纵向分层为“边缘-控制-中心”3个层次的结构,边缘层布放轻量化智能代理实时获取接入网的流量特征和设备状态,利用可编程交换机对数据包头部 QoS 标记(如 DSCP 或 802.1p 字段)和队列占用率进行抽取。控制层通过 SDN 控制器建立全局网络视图并集成边缘层报告多维数据,利用图算法计算出最优路径和资源分配方案。核心层依靠 NFV 资源池所提供的弹性计算能力对虚拟网络功能中实例的个数和参数配置进行动态调整。横向协作是通过标准化接口来实现跨域控制的,采用了 P4 语言定义的数据平面可编程接口,不同运营商的设备能够支持统一的流表规则下发和状态同步机制,从而解决传统协议兼容性不足的问题。

这种结构的动态适应性来自闭环反馈机制和策略自适

应能力。控制层根据实时数据对网络状态模型进行不断的更新,一旦发现某个链路利用率大于阈值,系统会自动触发三阶段响应,通过边缘代理对本地随机的早期检测队列进行管理以抑制突发流量。对 SDN 流表进行了调整,分流了一部分分流到轻载路径。如果核心层的 VNF 处理能力还不够强,那么就开始 NFV 编排器扩容的相关示例。

3.3 多技术融合优化方案

通过融合人工智能、区块链和意图驱动网络等尖端技术,多技术融合优化方案旨在构建一个自适应且可靠的网络拥塞控制系统。人工智能技术主要集中在流量感知和策略优化两个方面,以深度强化学习为核心的控制器能够对网络状态矩阵进行实时分析并对拥塞窗口算法参数进行动态调节,在 5G 边缘网络环境下,通过整合流量速度、队列长度和信道质量这三个维度的数据,该算法能够将突发流量的适应能力提升 40%,同时还能减少 15% 的数据丢失率。并利用区块链技术为跨域协作提供可信保障,利用智能合约对运营商之间资源进行交易和拥塞责任定义,实现跨域骨干网资源的协同管理,区块链节点自动记录流量转发路径及资源占用情况,当地区出现拥塞,根据合约规则对责任方进行溯源,触发补偿机制以消除传统协作存在的信任成本和纠纷处理延迟等问题。

意图驱动网络的引入进一步提升了系统的自动化水平,其通过自然语言接口将管理员的“确保了关键业务的低时延”等意图转化为可执行的策略组合,内容涉及流量分类,队列调度,路径选择几个层次。工业互联网场景下 IDN 系统能够自动识别 PLC 控制流优先级、联动 SDN 控制器预留专用时隙、协同 NFV 资源池进行轻量化入侵检测功能部署,在保证安全性的前提下,使控制指令传输时延保持在 2ms 之内。

4 总结

文章系统地阐述了在动态网络环境中拥塞控制中的 3 个核心对策,即智能预测以时空特征建模和主动调控来减少拥塞风险;分层协同架构进行跨层资源整合和闭环反馈以增强响应的时效性。多技术融合方案将 AI,区块链和意图驱动网络相结合,较好地解决了跨域协作和自动化部署困难的问题。

参考文献:

[1] 孙岩,张建民,黎渊,等.面向高性能计算的互连网络拥塞控制分析与评估[J].计算机工程与科学,2024,

46(2):209–216.

[2] 聂廷远, 孔琪, 王艳伟, 等. 一种优化 FPGA 布线拥塞的 FHO-BP 网络 [J]. 电讯技术, 2024, 64(5):785–792.

[3] 蒋成, 郭向坤. 基于蚁群算法的无线网络拥塞控制与实验研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(10):337–340.

[4] 黄凯欣. 基于时延的趋势感知的无损数据中心网络拥塞控制 [J]. 中国科技纵横, 2024(8):52–57.

[5] 晁凯, 康百成, 王双全. Huber-AQMRD 算法: 应对网络拥塞的性能改进 [J]. 现代电子技术, 2025, 48(1):65–70.