



计算机研究与发展

Journal of Computer Research and Development

大规模互联网服务的 低时延传输技术

吕格瑞, 赵员康, 张佳兴, 潘恒, 武庆华, 李振宇



中国科学院计算技术研究所
INSTITUTE OF COMPUTING TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



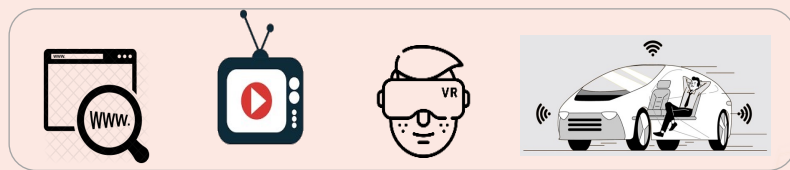
中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences



中国科学院
计算机网络信息中心
Computer Network Information Center,
Chinese Academy of Sciences

计算机研究与发展 2025年第10期发表
DOI: 10.7544/issn1000-1239.202550536

应用时延要求越来越苛刻



网络传输



网络接入异构动态

- 视频直播、智能体实时交互、AR/VR等应用将**爆发式增长**

➢ 视频直播: 150ms, 智能体交互: 50ms; AR/VR: 25ms

- 传统互联网传输技术: 面向非实时应用设计, 假设非移动网络, **无法适应异构动态网络环境下的低时延传输**

- 6G网络和空天地一体网络的**带宽跳变更加频繁**

➢ Starlink网络周期性带宽跳变抖动, 跳变幅度达60%[WWW24]

解决方法: 发展跨层、跨栈、全网协同的新一代互联网传输技术

挑战1：匹配性

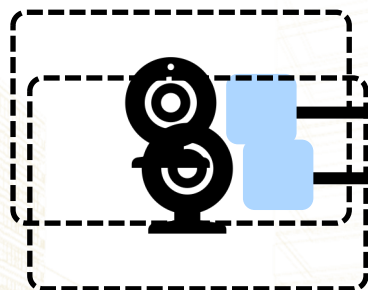
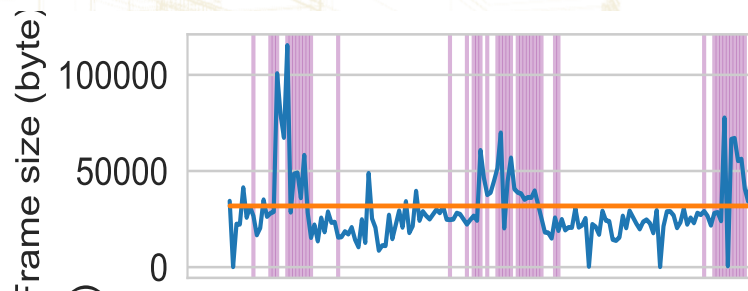
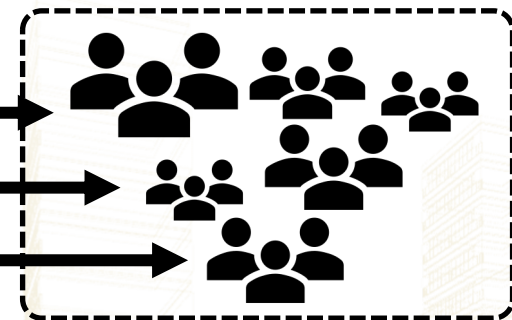
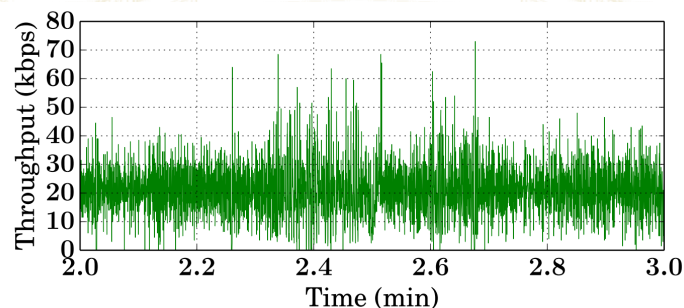
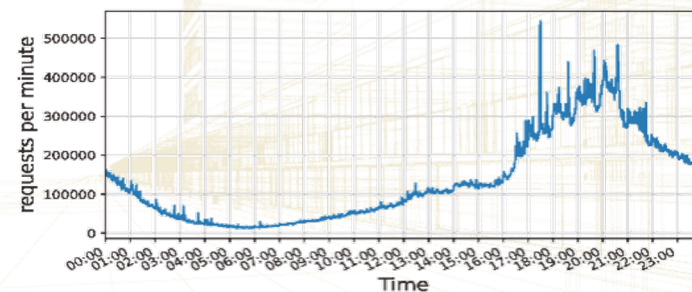
动态数据发送 vs 网络可用资源

挑战2：协同性

传输控制决策 vs 带宽跳变

挑战3：一致性

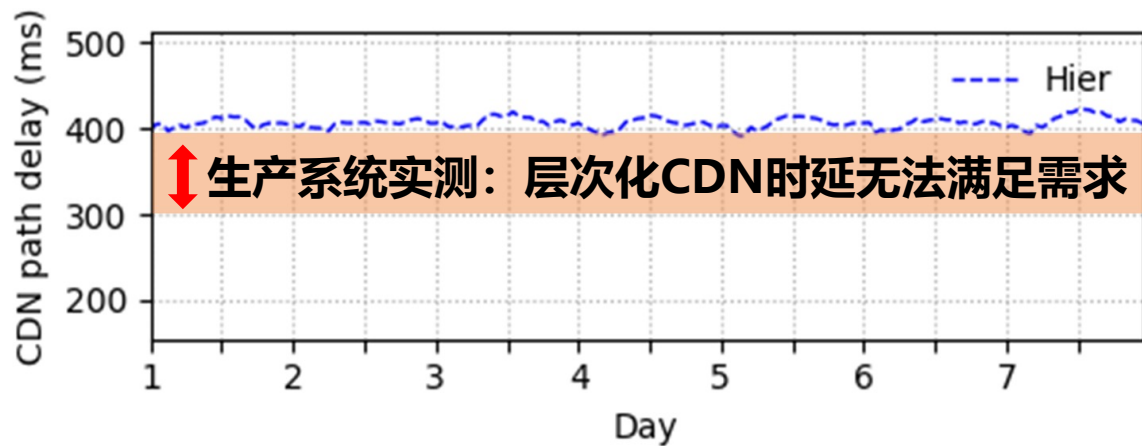
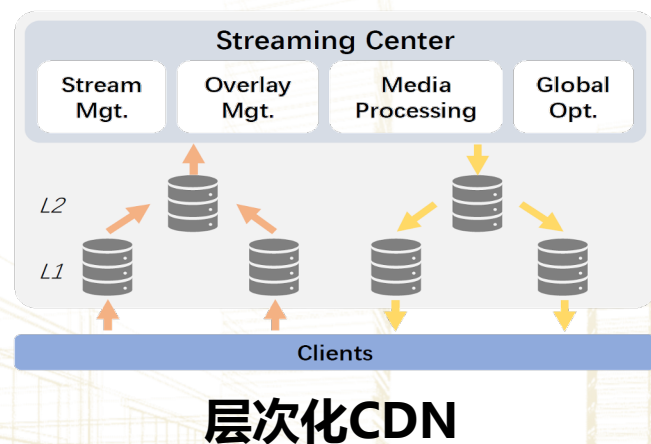
差异化业务 vs 设备固定处理

数据发送端**网络处理和传输****数据接收端****数据突发产生****网络跳变抖动****巨量实时请求**

实现了大规模互联网“**动态传输决策、协同传输控制、定制化传输加速**”的目标

构建了面向大规模互联网服务的协同传输技术体系

- 交互式应用时延 = 发送端时延 + CDN时延 + 接收端时延
- 针对CDN时延，Akamai于2000年左右提出**层次化CDN架构**，实现多层次缓存加速，**工业界一直沿用**

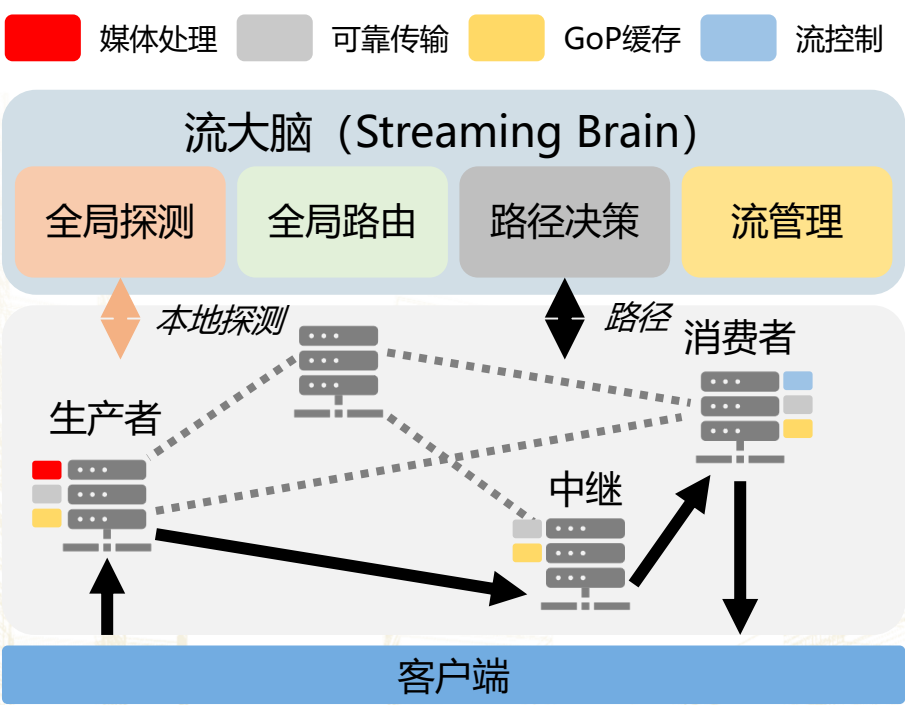


- 动态产生的应用数据无法预先缓存，**传统层次化CDN架构不再适用**

●构建CDN网络**最优路径计算模型**，融合实时网
络状态和动态数据产生模式

- 提出了**扁平化CDN架构**，发明了可扩展动态
路径选择和快慢路径结合的低时延转发技术
 - 云厂商CDN部署：**传输时延降低一半**

	LIVENET	HIER	impr. %
CDN path delay (ms)	188	393	52.2%
CDN path length	2	4	50.0%



扁平化CDN：灵活路由和处理

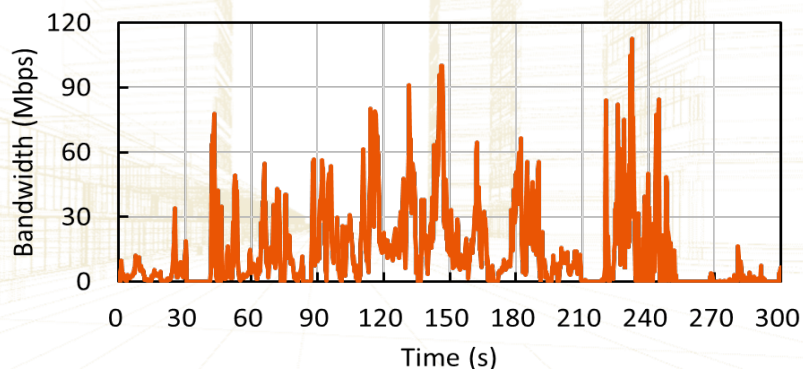
突破了沿用20余年的层次化CDN组网架构，使千万级并发请求的秒级直播成为可能

- 传输控制协议决定网络传输性能，1980s提出的TCP及其优化依赖ACK Clocking实现闭环控制

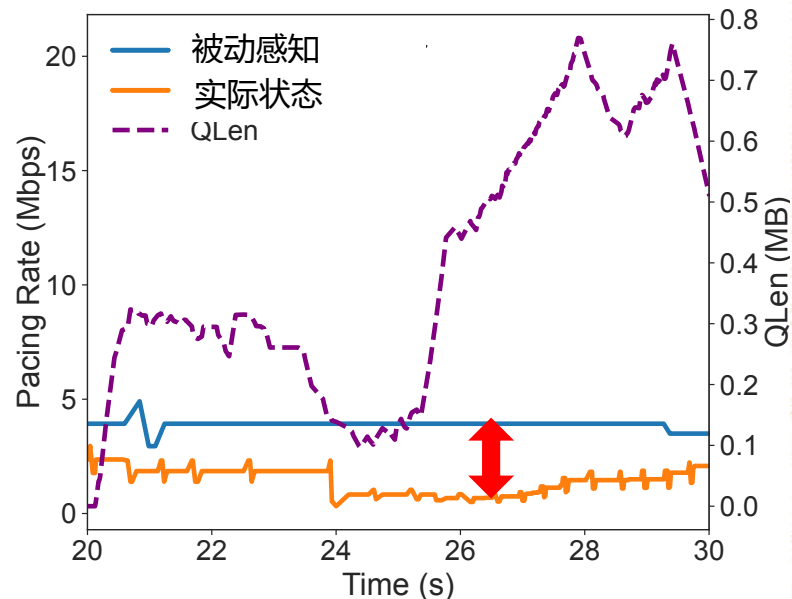
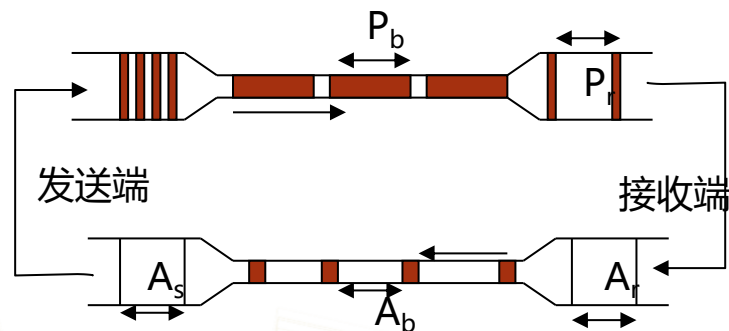
$$R = \frac{MSS}{RTT} \frac{1.2}{\sqrt{p}}$$

p : 丢包率;
 RTT : ACK Clocking单位

- ACK Clocking本质是发送端单点被动感知网络状态，在动态网络中无法实时感知网络状态

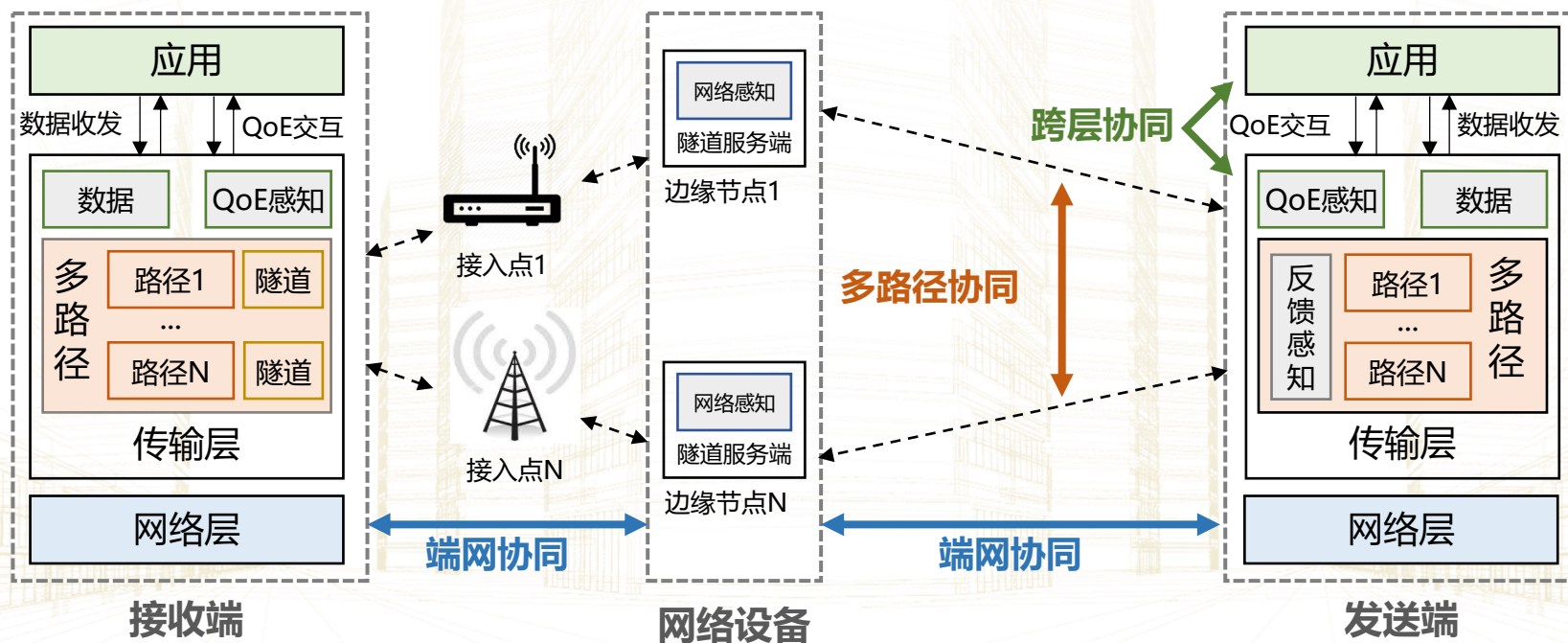


网络带宽跳变



传输决策不准确

- 发明了端网协同、多路径协同和跨层协同的系列传输协议，攻克了协同固有的互锁问题，实现了多点协同感知决策与闭环控制
 - 边缘网络部署，尾部请求时间降低高达50%



突破了传统单点被动感知决策的传输瓶颈

- 传统网络设备仅转发数据包，不感知应用语义，不处理数据包载荷

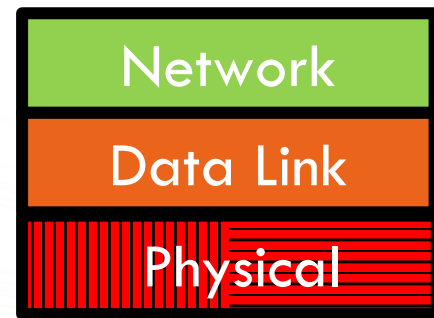
仅转发 $\langle P_{header} \rangle \xrightarrow{f} next\ hop$

- 传统网络设备处理机制**无法发挥**网络内计算能力

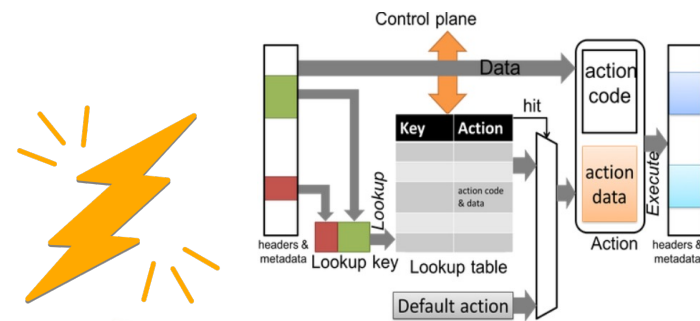
- 新型网络设备转发能力强，具备了一定的计算能力，“**边传边算**”成为可能

$\langle P_{header}, P_{\{payload\}} \rangle \xrightarrow{f} \{next\ hop | cont | aggr | reduce\}$

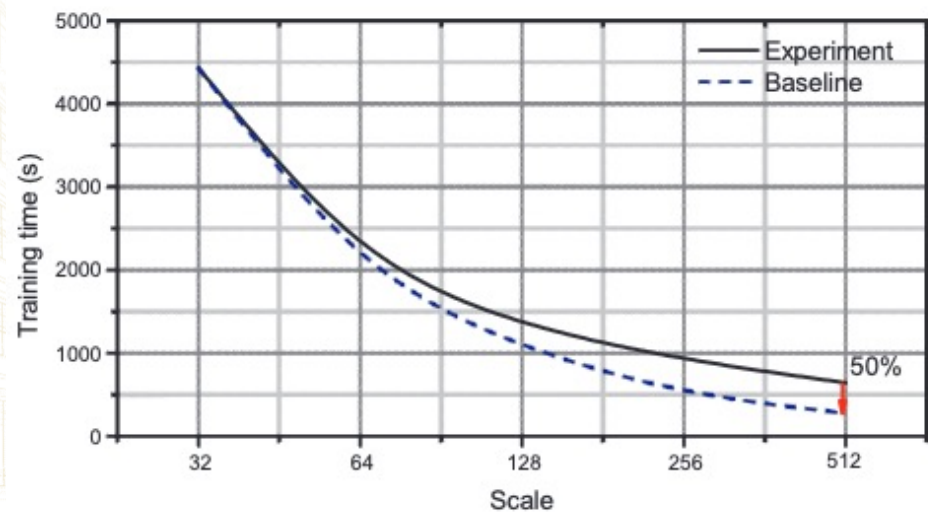
边传边算



传统网络协议

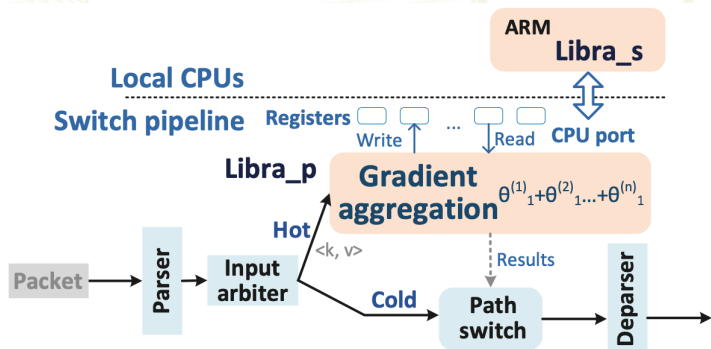


3.3Tbps, 数据面计算能力

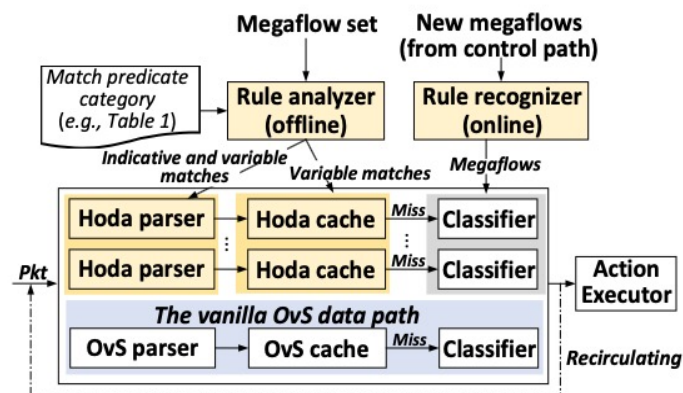


网络通信时间占到任务时间的一半[IMC 21]

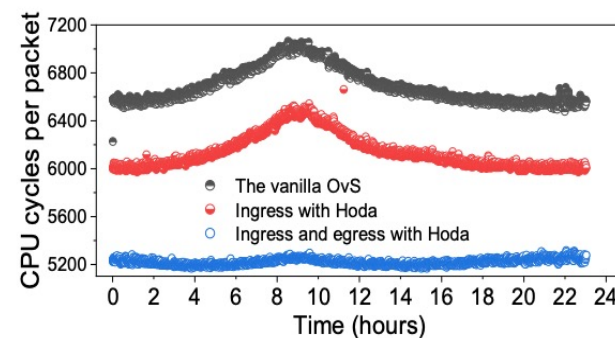
- 创新思路: 传统横向通用优化 → 纵向定制化协议设计
- 发明了算网融合的数据包处理和可编程定制化数据包处理技术, 缩短传输路径, 减少冗余处理
 - 云网络数据中心部署, 吞吐提升1.5~1.7倍



算网融合数据包聚合系统

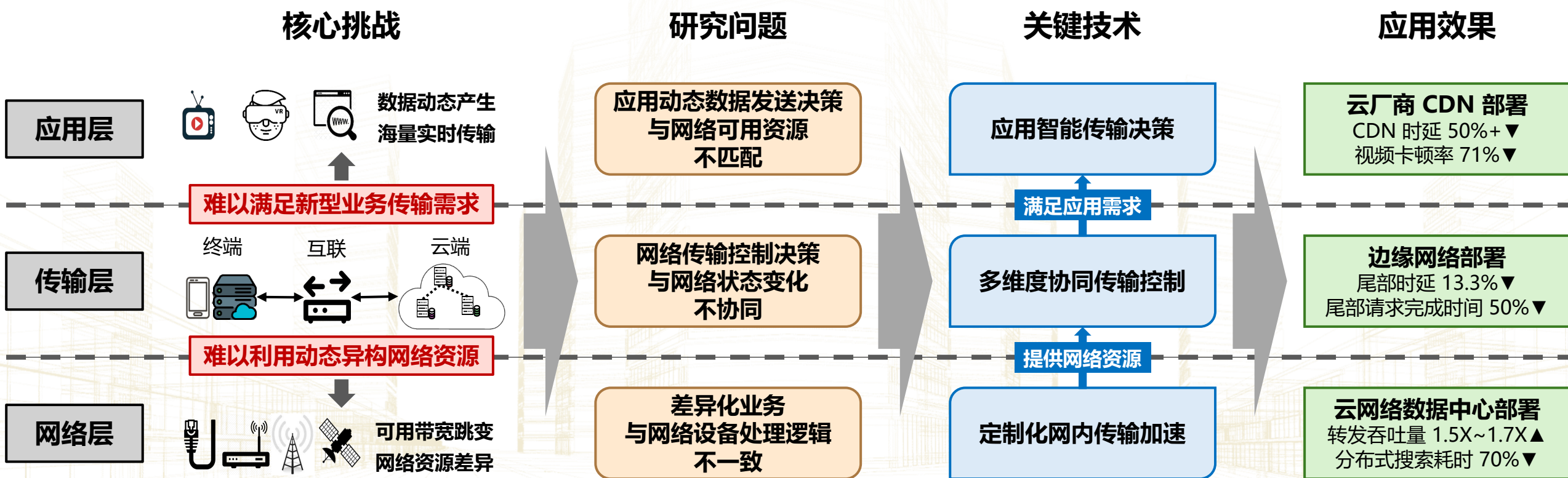


定制化数据包处理系统与大规模部署



突破了传统网络设备固定处理逻辑的性能瓶颈

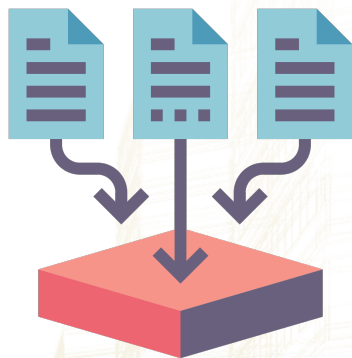
“跨层、跨栈、全网协同”的新一代传输体系





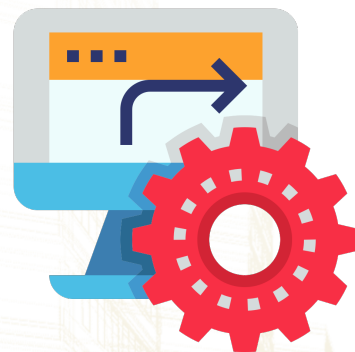
应用牵引

大模型低时延推理



协议演进

基于QUIC的内容传输



架构革新

AI驱动的互联网设计



范式变迁

端网的深度融合



计算机研究与发展

Journal of Computer Research and Development

感谢聆听！



中国科学院计算技术研究所

INSTITUTE OF COMPUTING TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences



中国科学院
计算机网络信息中心
Computer Network Information Center,
Chinese Academy of Sciences

- 计算机研究与发展 2025年第10期发表
- DOI: 10.7544/issn1000-1239.202550536