



Hairpin: Rethinking Packet Loss Recovery in Edge-based Interactive Video Streaming

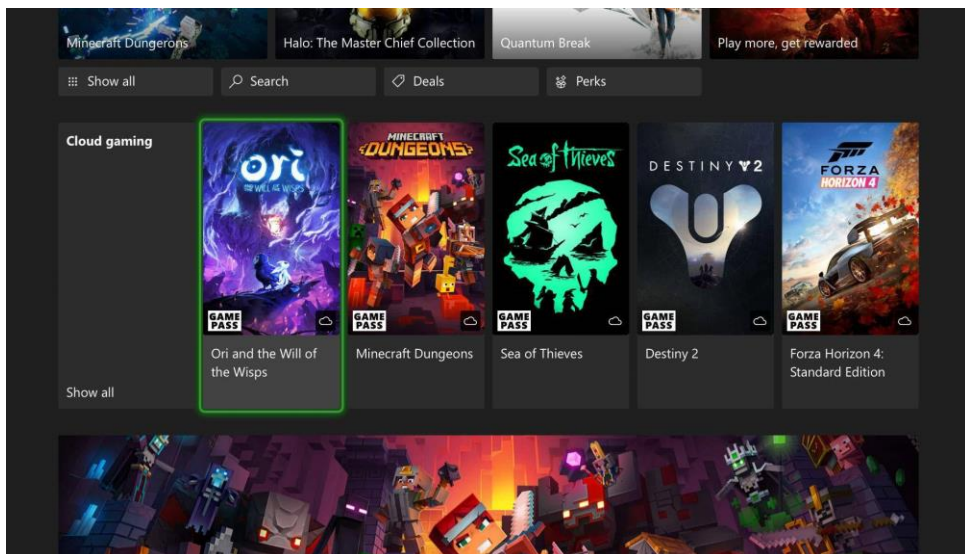
Zili Meng, Tsinghua University, Hong Kong University of Science and Technology, and Tencent; Xiao Kong and Jing Chen, Tsinghua University and Tencent; Bo Wang and Mingwei Xu, Tsinghua University; Rui Han and Honghao Liu, Tencent; Venkat Arun, UT Austin; Hongxin Hu, University at Buffalo, SUNY; Xue Wei, Tencent
NSDI, 2024

汇报人：孙铂钛
2024年11月10日

Content

- Background
- Related works
- Motivations
- Design
- Evaluation
- Conclusion

Background--Interactive Video Streaming



云游戏



远程驾驶

- 基于边缘的交互式流媒体服务应用越来越广泛，这些服务在远程服务器上运行应用程序，将内容流式传输给用户，并与用户实时交互。
- 与传统的视频流直播相比，它部署在边缘节点上，可以有效减少网络延迟。

Background--Interactive Video Streaming

基于边缘的交互式流媒体对传输提出了特定的要求！

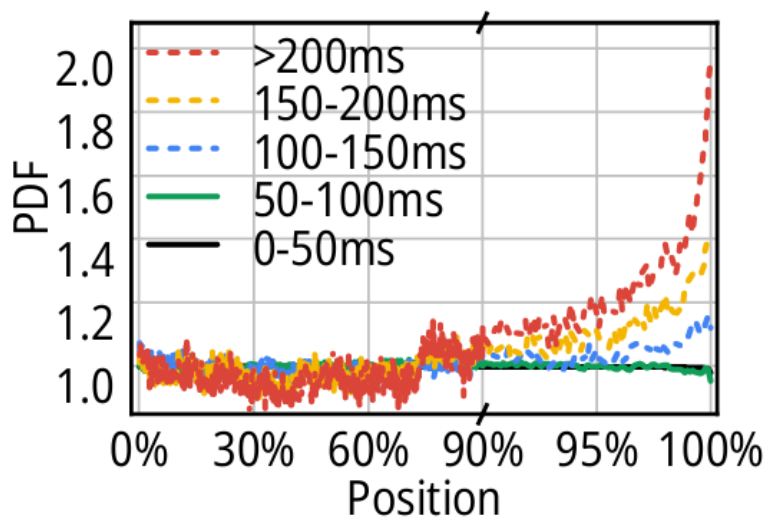


远程手术

- 严格的截止时间
- 可靠的传输
- 低带宽成本

Background--Interactive Video Streaming

严格的截止期限



帧在各延迟视频流中位置的概率密度函数

- 如果用户的端到端延迟较高，他们往往会退出会话，从而影响用户体验。
- 只要数据包可以在截止期限内交付，**更快的交付几乎不会提高用户体验。**
- 据统计，网络的端到端往返延迟不应超过50~150ms，这是应用程序所要求的最后期限（Deadline），我们应该**最小化截止期限错过率**（Deadline miss rate, DMR）。

Background--Interactive Video Streaming

可靠的传输

- 无法交付部分帧将导致图像质量严重下降。此外，由于帧之间的依赖关系，一帧的丢失还会导致后续帧的模糊。
- 常采用前向纠错（Forward error correction, FEC）在接收端恢复丢失的数据包，如果恢复失败，将重新传输丢失的数据包。即使用重传和冗余来确保可靠传输。

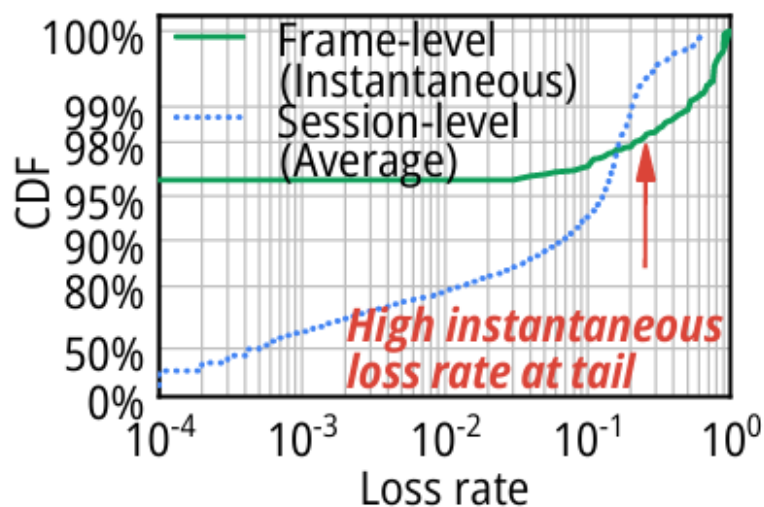


低带宽成本

- 带宽成本是最大的运营费用之一，考虑到用户对低运营费用和高视频质量的要求，服务提供商需要控制丢包恢复中的带宽成本。

Background--Packet Losses in Edge-based Interactive Streaming

高的瞬时丢包率



会话级和帧级丢包率的分布函数

- 为了将截止日期缺失率 (DMR) 控制在0.1%或更低, 服务提供商**即使在瞬时丢包率很高的情况下也必须及时传送视频帧。**

现有的解决方案主要分为以下两类：

- 重传
- 基于冗余的算法

重传

Frto[SIGCOMM'03] RFC 5681[IETF'09]

- 仅依靠重传不足以实现0.1%或更低的DMR。
 - e.g.当瞬时丢包率为20%时，即使在3次重传之后，仍然会有0.16% (0.2^4) 的数据包丢失。
- 由于每帧可能有数十到数百个数据包，因此即使丢失一个数据包都将违反该帧的截止期限要求。

基于冗余的算法

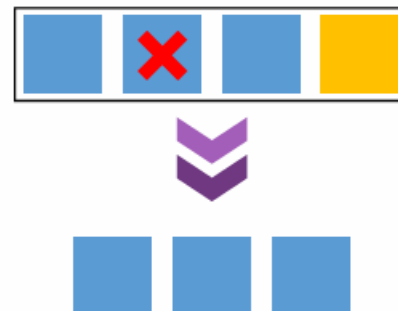
FBRA[MMSys'14]
RLAFEC[MMSys'22]

FracTal[MM'17]
Tambur[NSDI'23]

OptFEC[TIT'19]

- 现有的自适应FEC解决方案**仅针对初始传输优化FEC参数**。
 - 根据丢包率调整FEC数据包的数量，但在发生丢包时还是像往常一样重传。
- 丢包并不是确定性的，为了实现0.1%或更低的DMR，FEC速率需要远远高于损失率，从而**导致极高的带宽成本**。

➤ Forward error correction (FEC)

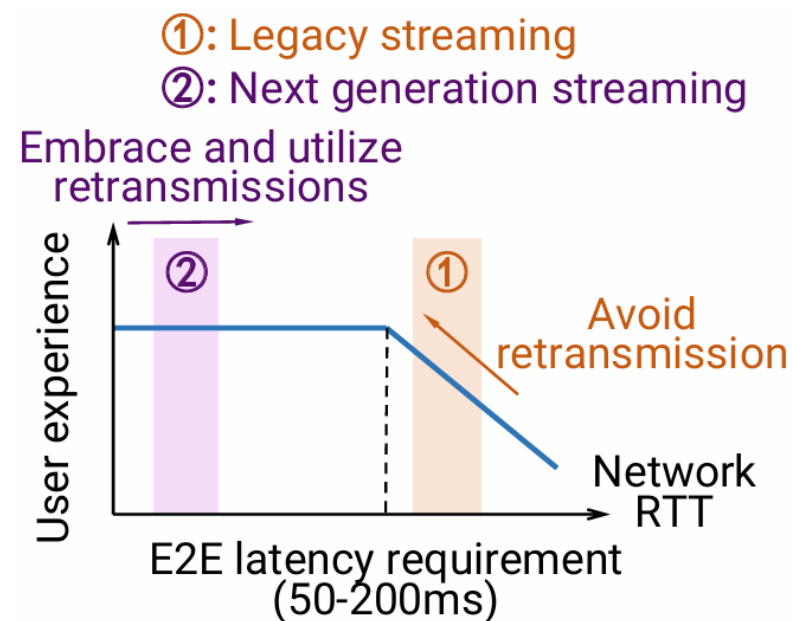


Motivation

- 由于多接入边缘计算（MEC），5G和WiFi6等技术的应用，网络往返时间（Round-Trip Time, RTT）可以控制在10~20ms。
- 人类对交互延迟的感知能力大约在50~200ms。

Capacity	Stadia	GeForce	Luna
15 Mb/s	16.0 (1.7)	16.8 (1.5)	17.2 (2.1)
25 Mb/s	16.6 (2.2)	16.8 (1.6)	17.0 (1.5)
35 Mb/s	17.1 (1.4)	18.2 (1.8)	16.4 (1.6)

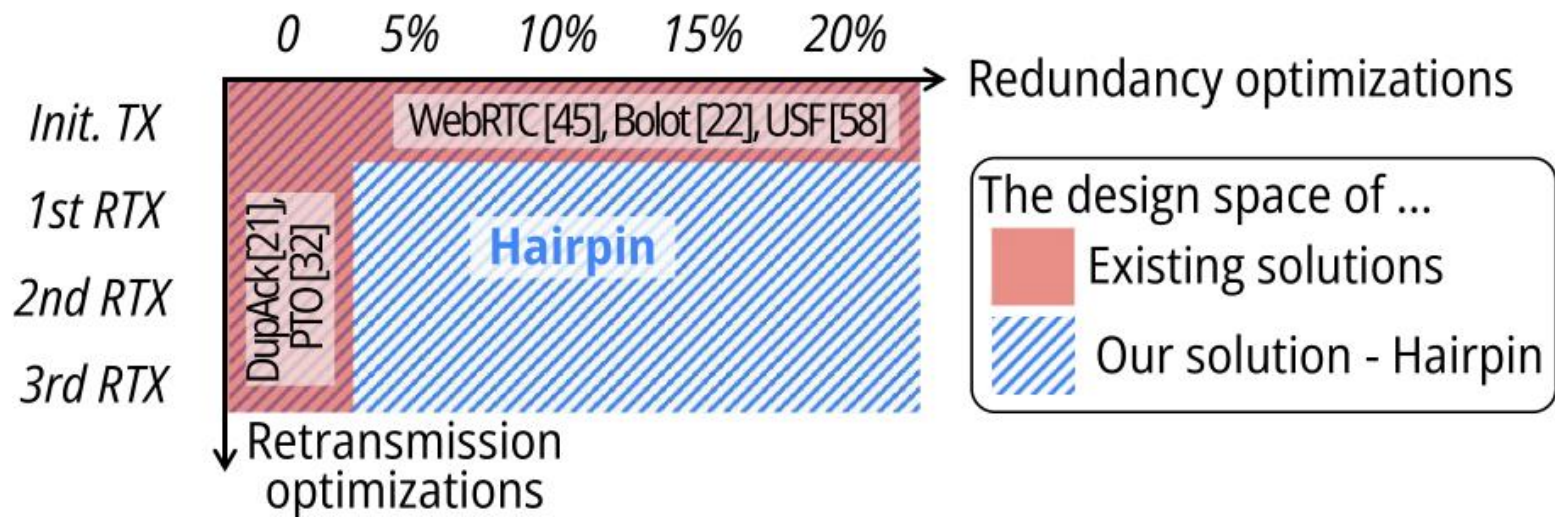
Xu等人测量的RTT (ms) [IMC'22]



可以进行多次重传，但不会影响用户体验！

Motivation

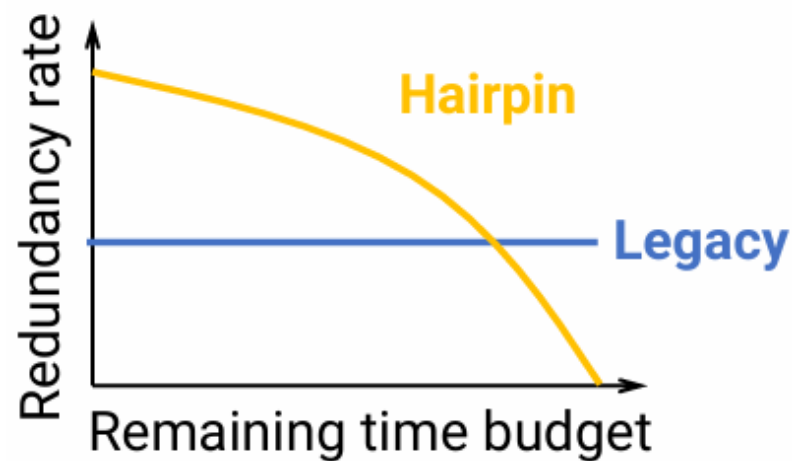
RTT远低于最后期限，可以实现冗余和重传的联合优化！



Design--Insight: co-optimize redundancy and retransmission

基本思想：在**优化冗余率时考虑未来的传输机会**，即想要一个基于多次传输机会规划的自适应冗余率。

- 当一批数据包具有更多传输机会(即截止期限还很长)时，可以降低冗余率以节省带宽成本。
- 当这些数据包的剩余时间由于重传而越来越接近截止期限时，可以进一步提高冗余率以避免错过截止日期。



Design--Insight: co-optimize redundancy and retransmission

Suppose: RTT = 20ms, Deadline = 50ms

loss rate = 20%



loss rate = 40%




Legacy

1st (20%) 
2nd (20%) *All delivered*

Hairpin

1st (0%) 
2nd (50%) 

Legacy

1st (20%) 
2nd (20%) 
3rd (20%) 

Hairpin

1st (0%) 
2nd (50%) 

通过在传输层共同设计冗余和重传，可以降低DMR并节省带宽成本！

Design--Challenges

➤ 时间依赖性

- 当考虑多个传输机会时，一轮传输中FEC参数的确定将影响下一轮的优化。

➤ 空间依赖性

- 每次传输中的冗余率和块大小是耦合的。
 - a. 需要重传的数据包越少，就会鼓励更激进的冗余率。
 - b. 当使用较大的块时，块的分散可能导致错过截止时间。

➤ 复杂的目标

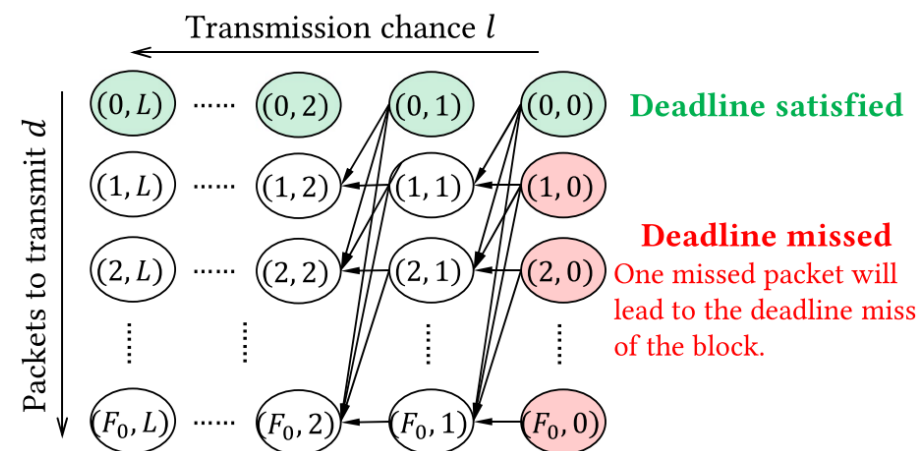
- 需要考虑多个潜在的传输回合和复杂的网络条件，截止时间未命中率和带宽成本难以估算。

Design--Model Formulation and Optimization

马尔可夫链广泛应用于序列决策过程的优化，因此可以将问题表述为马尔科夫决策过程 (Markov decision process, MDP) 。

- 将多轮规划中的时间依赖性编码为马尔可夫链中的边。
- 将变量之间的空间依赖性编码到马尔可夫链的节点中。
- 用马尔可夫链方法显式优化截止期限错过率和带宽开销。

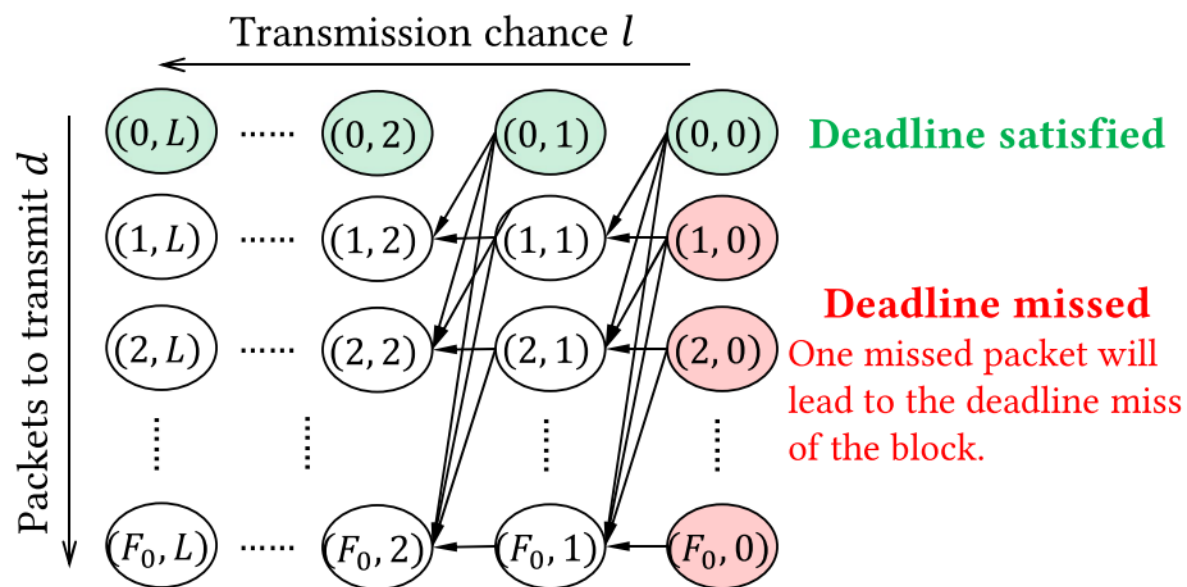
目标：找出节点 (B, L) 的最佳冗余率，其中B是给定的块大小，L是剩余传输机会。



Design--Model Formulation and Optimization

变量之间的时间依赖性和空间相关性都可以用二维马尔可夫链表示。

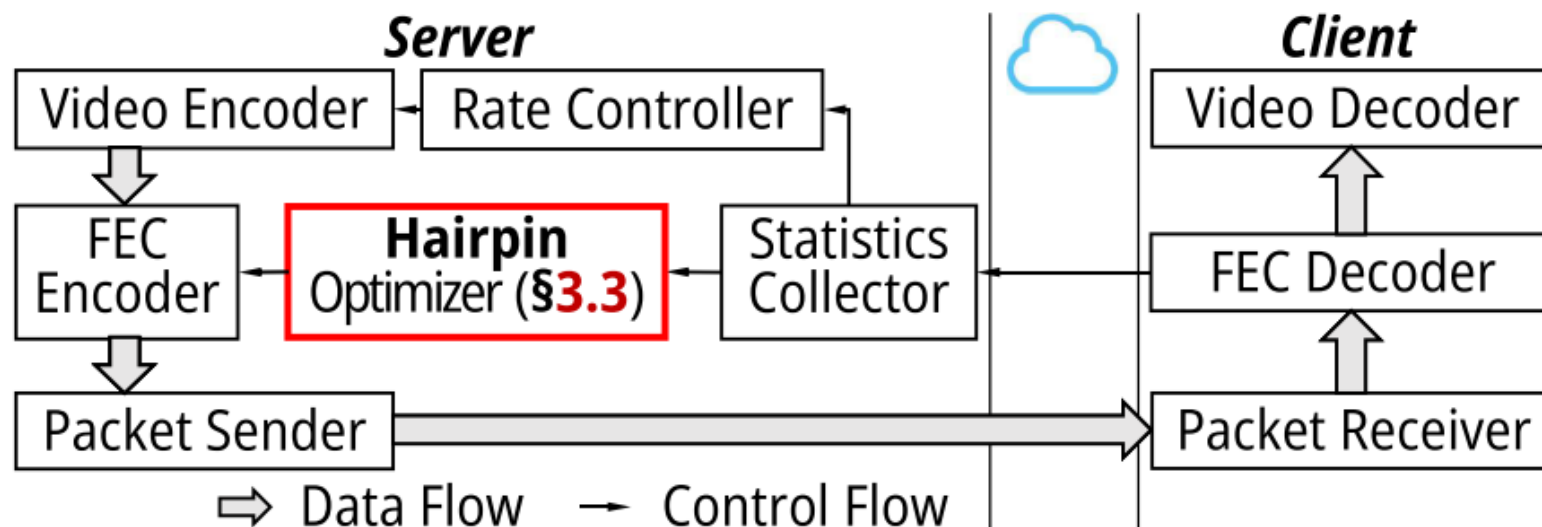
- 步骤1：计算剩余传输机会。
- 步骤2：生成吸收马尔可夫链。
- 步骤3：计算最佳块大小。
- 步骤4：获取最佳参数。



Hairpin可以根据步骤3计算出最优块大小，并根据步骤2计算出该块大小的最优冗余率。

Design--Hairpin Implementation

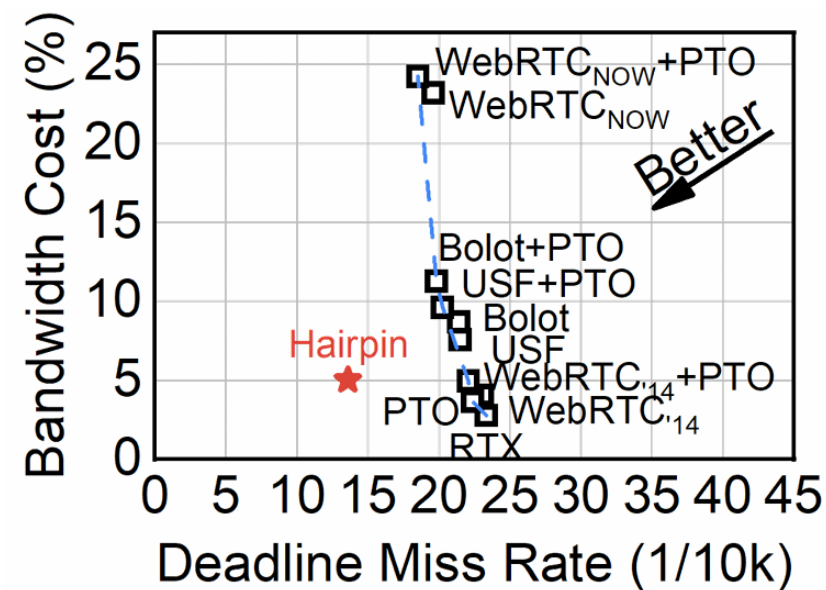
Hairpin插入现有的应用层和传输层之间，根据当前网络情况对冗余参数进行优化。



Hairpin也可以与其他编解码器一起工作，只要它们提供参数。

Evaluation

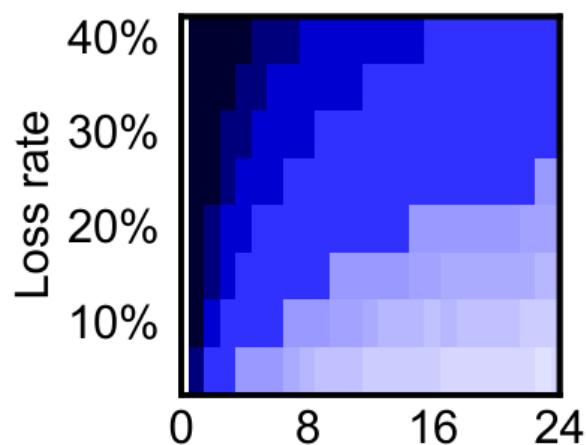
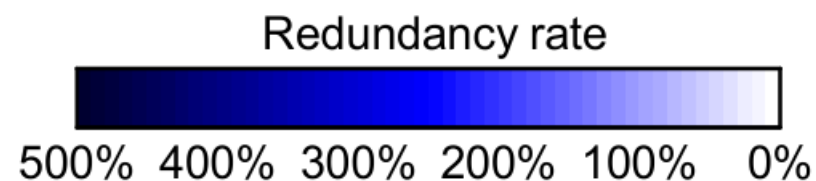
- 分别在基于ns3的WebRTC模拟器和的云游戏服务的生产服务器中实现
- 3组不同网络条件下的带宽跟踪
 - WiFi, Ethernet, cellular
- 对比10个Baseline (2重传×5冗余)
- 评估指标
 - 截止日期错过率 (Deadline miss rate)
 - 带宽成本 (Bandwidth cost)



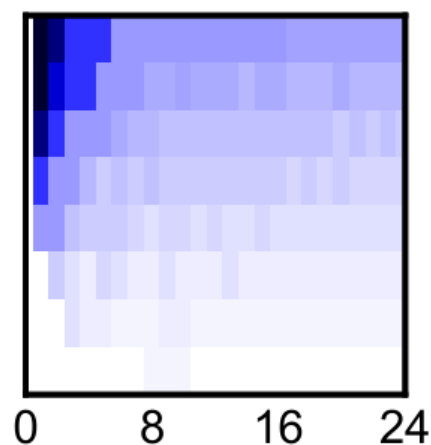
与所有现有方法相比, Hairpin取得显著优势。

Evaluation

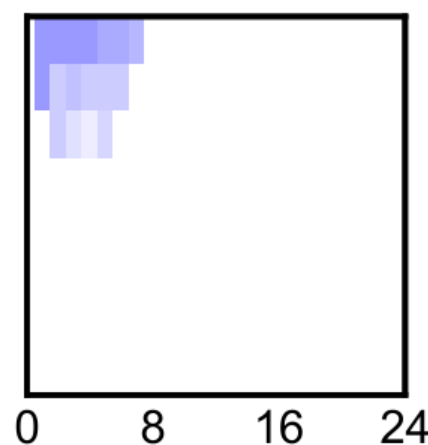
L是剩余传输机会次数



(a) Redundancy rate ($L=1$).



(b) $L=2$.



(c) $L=3$.

Conclusion

- $latency_{tail} = (1 + RTX_{tail}) \times RTT_{tail}$ Hairpin提出一个新的丢包恢复方法来降低尾部延迟。
- Hairpin区分不同的重传，并利用马尔可夫决策过程对冗余与重传进行联合优化。
- 当时间预算充足时，依靠重传；当截止时间临近时，依靠冗余。
- Hairpin同时降低了截止时间错过率和带宽成本。



Hairpin net shot

Limitations

- 网络延迟的假设
 - Hairpin的**有效性基于边缘服务器和客户端之间的网络延迟主要由传输延迟组成**。如果其他延迟组件（如编码、解码延迟）占主导地位，其优化效果可能会受到限制。
- 部署成本
 - Hairpin**需要在服务器和客户端进行修改以支持冗余和重传机制**。对于依赖TCP的应用来说，可能需要更深层次的协议栈修改，这可能会增加部署的复杂性和成本。
- 实时测量的准确性
 - Hairpin**依赖于对网络条件的实时测量来优化冗余参数**。如果网络条件的变化比Hairpin的测量窗口更快，那么它可能无法及时适应这些变化。

- 考虑其他类型的网络流量和传输协议，它们也可能适用于类似的优化策略。
 - 例如远程控制（如无人机和机器人操作）和实时交易系统对延迟和可靠性的要求同样非常高。此外，随着物联网设备的增多，这些设备产生的数据流也需要高效的网络传输策略。
- 应用于其他类型的网络问题，如自适应视频流中的码率调整。
 - 是否可以通过类似MDP的方法来进一步优化码率调整策略，从而在保持视频质量的同时，进一步降低带宽消耗和提高传输效率。
 - 开发一种新的视频编码算法，该算法能够在网络状况不佳时自动调整编码复杂度，减少数据量，从而降低丢包率。这种方法可以与Hairpin机制相结合，从应用层和传输层两个维度共同优化视频流传输。



请各位老师和同学批评指正！

2024.11.10