



XXXX

基于网络与业务联合感知的无线视频跨层传输与码率自适应技术

邓志吉¹, 钟广海², 姜哲华², 叶奇³, 符哲蔚², 张朝阳¹

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江大华技术股份有限公司, 浙江 杭州 310053;

3. 全省视觉物联融合技术重点实验室, 浙江 杭州 310053)

摘要: 随着视频应用加速迈向智能化与无线化, 开放且变化的无线网络环境给高质量视频传输带来了严峻挑战, 难以满足数字安防、工业监控等关键业务对低时延、高可靠性的严苛需求。为此, 本文提出一种基于网络与业务联合感知的无线视频跨层传输与码率自适应技术方案。首先, 设计了一种融合无线网络拥塞状态感知与视频编码控制的跨层传输优化机制, 实现视频传输与网络资源的协同调度, 显著提升带宽利用效率; 其次, 提出了一种端到端的码流自适应方法, 通过全链路无线状态感知与编解码参数联合调控, 实现播放端与设备端协同的码率调整, 保障视频流畅播放。实验结果表明, 该方案在动态无线环境下有效增强了视频传输的实时性与稳定性, 能很好地适用于当前视频从有线传输向5G、Wi-Fi 6等新兴无线传输转变趋势下的高要求智能服务场景。

关键词: 视频无线传输; 跨层传输优化; 码流自适应

中图分类号: TN919.3

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Wireless Video Cross-Layer Transmission and Bitrate Adaptation Technology Based on Joint Network and Service Perception

DENG Zhiji¹, ZHONG Guanghai², JIANG Zhehua², YE Qi³, FU Zhewei², ZHANG Chaoyang¹

1. Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, 310058

2. Zhejiang Dahua Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310053

3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Harmonized Technology of Vision & Transmission, Hangzhou, Zhejiang, 310053

Abstract: As video applications rapidly advance toward intelligence and wireless capabilities, the open and dynamic nature of wireless networks poses severe challenges for high-quality video transmission, making it difficult to meet the stringent demands of low latency and high reliability required by critical applications such as digital security and



industrial surveillance. To this end, this paper proposes a wireless video cross-layer transmission and bitrate adaptation scheme based on joint network and service perception. First, a cross-layer transmission optimization mechanism was designed to integrate wireless network congestion state awareness with video encoding control, achieving coordinated scheduling of video transmission and network resources, significantly improving bandwidth utilization efficiency; Secondly, an end-to-end bitrate adaptation method is proposed, which achieves collaborative bitrate adjustment between the playback and device ends through full-link wireless state sensing and joint control of encoding/decoding parameters, ensuring smooth video playback. The experimental results demonstrate that this solution effectively enhances the real-time performance and stability of video transmission in dynamic wireless environments, making it well-suited for high-demand intelligent service scenarios under the current trend of transitioning from wired to emerging wireless transmission technologies like 5G and Wi-Fi 6.

Key words: Wireless video transmission, Cross-layer transmission optimization, Bitrate adaptation

1 引言

随着网络技术和多媒体应用的迅猛发展，视频数据已成为互连网络中占比最高的类型，在全球数据通信中占据主导地位。近年来流媒体视频在互联网总流量中的比例持续攀升，已超过80%，且仍在快速增长。与此同时，视频应用正朝着高分辨率、低延迟、智能化和无线化的方向不断演进，视频服务从传统的有线网络向5G、Wi-Fi 6等无线网络环境迁移。然而，无线网络的开放性、带宽波动、信号干扰和移动性等因素，给视频流媒体的传输质量带来了严峻挑战。特别是安防监控^[1]、应急救援^[2]、能源矿山^[3]和高清直播^[4]等行业应用场景，对视频传输的稳定性与可靠性提出了更高要求，不仅需要保障连续流畅的播放体验，还需确保关键视频帧I帧不丢失、不延迟，以支持精准的智能分析与实时决策。因此，如何在动态无线网络环境下提升视频流媒体传输的稳定性和可靠性，已成为当前视频通信领域亟待解决的核心问题。

针对无线网络视频流畅传输这一难题，国内外学者从视频编码优化、无线传输增强、码率自适应控制三个维度开展了一系列研究探索：

在视频编码优化方面，参考文献[5]提出了一种基于语义通信的深度无损传输范式，通过使用

深度视频语义编码模型来实现实时视频传输中的深度联合信源信道编码，在无损传输场景中显著提高恢复视频帧的质量；参考文献[6]也提出了一种面向视频语义传输的联合信源信道编码架构，引入双层信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）自适应机制，根据信道状况动态调节运动特征和语义特征的保护强度。上述方案主要通过智能编码提升视频的传输质量。

在无线传输增强方面，参考文献[7]梳理了深度强化学习等人工智能技术应用于视频传输优化的研究与进展情况，主要通过人工智能的方式分别进行网络和视频传输的优化；参考文献[8]提出一种面向智能反射面辅助的无线视频传输方案，利用可重构智能表面增强视频信号传输；参考文献[9]通过多频协同以及波束赋形，提高视频传输可靠性；参考文献[10]提出了一种面向物联网系统的、基于跨层优化的非对称视频传输策略，联合了优化应用层的视频编码结构、MAC层的功率控制与信道分配，以及物理层的调制编码。上述方案主要聚焦终端发送侧的无线射频优化与网络智能优化。

在码率自适应算法方面，参考文献[11]提出了Pensieve系统，首次使用深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）自动生成码率的自适应算法框架，以客户端观察到的状态作为输

入，直接输出下一个视频块应选择的码率；参考文献[12]设计了一个在线强化学习（Online Reinforcement Learning, Online RL）框架，直接在生产环境中优化移动视频通话，创新性地将实际与目标码率的差值作为状态输入以补偿编码动态，在持续优化体验的同时确保服务鲁棒性；参考文献[13]提出一种面向视频流媒体的跨层优化系统，其核心算法权衡丢包与改善终端用户视频观看体验之间的关系，结合应用层提供的“洞察”与部分可靠协议来优化视频流媒体；参考文献[14]提出了一种基于深度强化学习（DRL）的自适应码率方法，将基于HTTP的动态自适应流媒体（Dynamic Adaptive Streaming over HTTP, DASH）视频流建模为马尔可夫决策过程学习模型；参考文献[15]提出了一种基于增强深度强化学习的自适应码率控制方法，利用门控循环单元（Gated Recurrent Unit, GRU）对时序特征进行有效建模，采用近端策略优化算法动态调整码率策略以优化用户体验；参考文献[16]提出了码率自适应限制感知网络广播内容增强（Bitrate-Adaptive Limit-Aware Netcast Content Enhancement, BALANCE）的量子计算框架，通过分析视频片段的视觉复杂度与预估数据消耗，预先选择最优的视频片段组合。上述方案通过自适应码率（Adaptive Bitrate, ABR）智能算法改进，实现了平台端和手机端的视频播放优化。

尽管已有研究取得一定进展，但仍存在局限：一是现有方案多聚焦于编码优化或传输优化的单一维度，未能充分融合视频业务特征与网络状态信息进行联合感知与动态协同；二是当前优化策略多集中在发送端或接收端的单点改进，缺乏“设备-云-手机”端到端系统中设备端编码、无线传输、云转发与播放端解码播放的闭环反馈机制，难以实现全链路的协同优化与实时适配；三是实际部署中，作为设备发送端的嵌入式网络摄像机通常存在低内存、低算力的低成本硬件特

性，难以像平台端和手机端一样，支撑复杂算法的实时运行。

为此，本文提出一种基于网络与业务联合感知的无线视频跨层传输与码率自适应机制，立足于视频业务需求与无线网络状态的深度耦合，从数据包调度、编码参数调控到码流适配，构建端到端的联合状态感知与策略控制框架，减轻设备端的算力和存储开销。通过实时感知全链路无线接收信号强度、无线协商速率、网络丢包、网络时延、网络带宽等网络状态与视频播放卡顿、视频丢帧、视频码率等业务特征，实现动态码率调整与资源匹配，有效提升带宽利用效率与传输稳定性，保障关键视频业务在5G、Wi-Fi 6等新兴无线网络环境下的低时延、高可靠传输需求，为高价值智能视觉应用提供坚实支撑。

2 无线视频跨层传输与码率自适应技术方案

无线视频跨层传输与码率自适应技术的整体方案如图1所示，采用端到端协同架构，构建基于网络与业务联合感知的协同优化机制，实现从设备端到播放端的全链路动态适配。

在设备端，本文提出了一种基于无线网络拥塞感知与视频编码传输联合驱动的视网融合跨层传输优化方法。该方法在视频数据包粒度层面实现精细的网络与视频协同调度：通过实时监测无线信道带宽变化与网络拥塞状态，驱动无线拥塞控制算法灵活调度视频包传输时隙，提升无线网络视频传输带宽利用率。

在播放端与设备端协同方面，本文提出了一种基于全链路无线网络感知与视频编解码联合调控的端到端码流自适应方法。该方法在视频帧级维度实现粗粒度的视网匹配调控，通过视频解码终端与视频编码源端策略协同，联合感知网络带宽波动与播放质量的变化趋势。基于双反馈机制，动态调整视频编码码率与关键帧间隔，使码



流与当前可用带宽精准匹配，显著降低播放卡顿率与画面延时，保障高质量的观看体验。

本方案通过设备端对无线网络资源的实时感知与播放端对网络状态和业务质量的综合评估，实现网络拥塞控制与视频编码策略的联合决策，指导视频编码参数配置、数据包发送调度及码流调控行为，达成端到端的联合网络感知与业务自适应控制，提升视频传输的流畅性，保障低延时效果。

2.1 跨层传输优化技术

基于无线动态感知的跨层传输优化技术主要应用于设备发送端，如图2所示，发送端自适应视频编码模块将编码好的视频帧送入网络传输调度模块，网络传输调度模块将视频帧按照一定大小切割成不同大小的视频包，以视频包形式向接收端发送数据。无线模组驱动模块实时感知无线资源协商速率和接收信号强度，并将无线参数送入无线拥塞控制模块，动态计算无线拥塞窗口值（Wireless Congestion Window，W-CWND）；同时，接收端收到视频包数据后，反馈接收信息给发送端；发送端根据接收端反馈信息和发送端自身状态信息进行网络传输状态感知，并采用传统IP网络拥塞控制算法计算传统拥塞窗口（Traditional Congestion Window，T-CWND）。此时，发

送端拥塞窗口决策模块，可以根据无线拥塞控制模块和IP网络拥塞控制模块两方提供的拥塞窗口值，综合计算实际生效的最优拥塞窗口值（Congestion Window，CWND），发送端的网络传输调度模块根据CWND控制发送队列调度模块进行视频数据发送。

该方案的核心模块是无线拥塞控制模块，创新性的综合了无线网络资源动态感知来计算拥塞窗口值W-CWND，相比于传统只通过业务发送情况感知拥塞的方案，更加精准和实时。

基于无线动态感知的拥塞控制方法如图3所示，发送设备通过无线驱动获取接收信号强度指示（Received Signal Strength Indicator，RSSI）和无线协商速率RATE参数，确定当前链路的干扰状态 W_{STATE} ，然后根据 W_{STATE} 计算当前链路的传输调度时隙timeslot。传输调度时隙timeslot的评估方法如公式（1）所示，其中 θ_1 ， θ_2 ， θ_3 为不同无线干扰情况下的调度时延阈值，在视频安防场景中，推荐的 θ_1 ， θ_2 ， θ_3 经验值分别为40ms，50ms和60ms。

$$timeslot = \begin{cases} \theta_1 ms & W_{STATE} \text{ 为强干扰} \\ \theta_2 ms & W_{STATE} \text{ 为弱干扰} \\ \theta_3 ms & W_{STATE} \text{ 为无干扰} \end{cases} \quad (1)$$

根据协商速率RATE、传输调度时隙timeslot

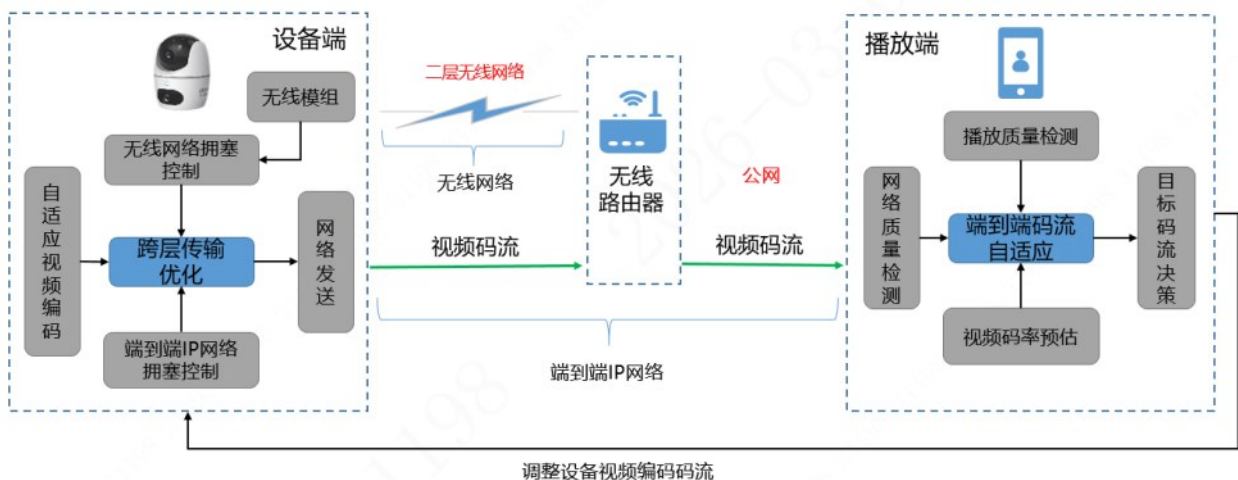


图1 无线视频跨层传输与码率自适应技术



图2 基于无线动态感知的跨层传输优化技术

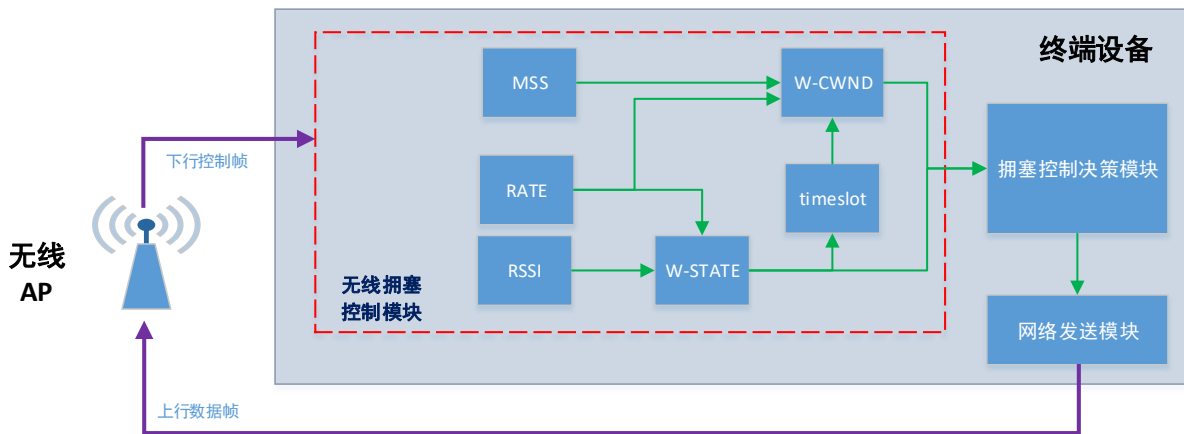


图3 基于无线动态感知的拥塞控制方法

和最大片段大小 (Maximum Segment Size, MSS), 可以计算出当前无线拥塞窗口 W_{CWND} , 如公式 (2) 所示, 其中 μ 为设备实际协商速率的折算因子, 根据不同干扰情况进行选择, 例如在 Wi-Fi6 标准中, 此处推荐的 μ_1, μ_2, μ_3 经验值分别为 $1/4, 1/3$ 和 $1/2$ 。

$$W_{CWND} = \frac{RATE \cdot \mu \cdot timeslot}{MSS} \quad (2)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_1 & W_{STATE} \text{ 为强干扰} \\ \mu_2 & W_{STATE} \text{ 为弱干扰} \\ \mu_3 & W_{STATE} \text{ 为无干扰} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 端到端码流自适应技术

端到端码流自适应技术如图4所示, 实现了视频解码终端与视频编码源端策略协同。该技术采用解码播放质量检测和网络传输质量检测结合的用户体验质量 (Quality of Experience, QoE) 评估方案, 根据双重检测算法评估端到端视频质量, 自适应调整和切换码流以适应当前网络带宽能力, 提升视频播放流畅性。在无线网络带宽出现大波动时, 用户播放画面能自动切换到低码率进行播放; 无线网络带宽恢复平稳时, 播放画面又能够自动恢复为高码率播放。

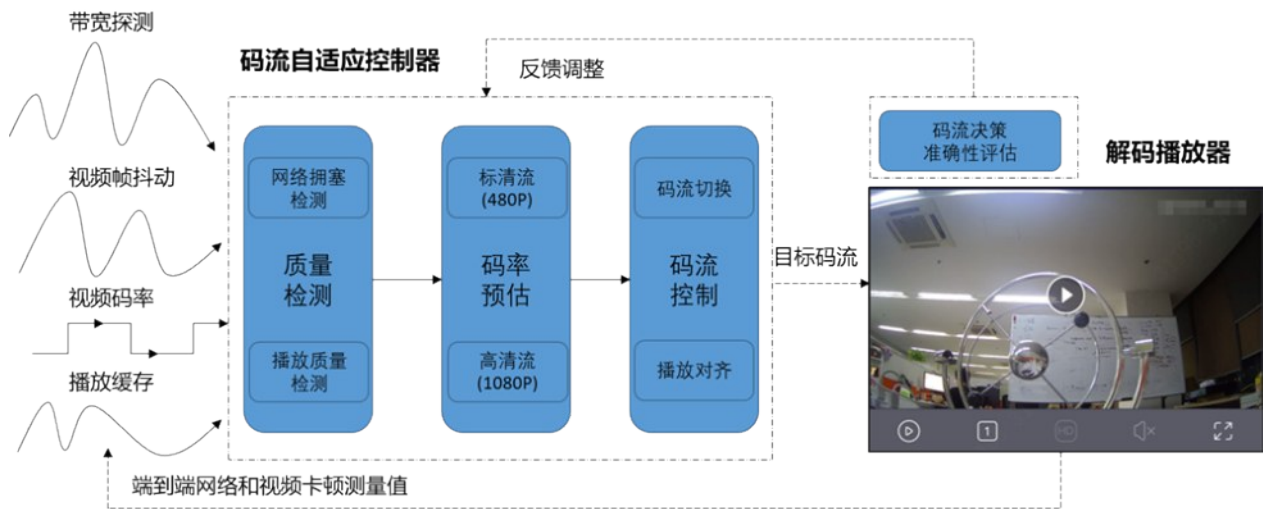


图4 端到端码流自适应技术原理

整个码流自适应切换过程中，画面播放不停止，实现画面无缝切换，整个技术方案从视频源到播放全链路打通，端到端码流自适应控制方法如图5所示。

设备端的发送反馈模块上报当前视频帧发送信息，播放端根据反馈的视频帧发送、视频帧接收以及视频帧播放缓存信息，通过码流评估模块的播放质量检测和网络质量检测算法对当前码流进行评估，将评估结果送入码流控制模块，进行调整策略决策，最后播放端将控制策略反馈给设备端，由设备端进行码流调整处理，设备的码流调整模块根据策略调整视频码率等参数。

端到端码流自适应控制的主要难点是播放质量检测和 network 质量检测的准确性和及时性，本方案也进行了相关的优化工作。

1) 播放质量检测方法

本方案基于播放缓存时间和视频帧接收间隔时间进行播放卡顿检测，相比传统单纯通过播放缓存阈值触发卡顿的方式，本方法结合视频帧网络接收抖动，能够快速识别播放卡顿发生，识别精度为帧级别。

如图6中，当视频帧序号为5、6、7的视频帧接收间隔出现大的波动时，由于当前播放缓冲还有4个视频帧（其中一个正在解码播放），故按照25帧帧率播放耗时，能够容忍的最大网络抖动间隔为160ms，5号帧的波动能够通过播放缓存抵消。但当帧序号为5的帧到达播放缓冲时，此时的播放缓冲中将无缓存视频帧，那么后面的帧序号6、7由于帧间隔超出200ms的播放间隔（直播行业一般认为200ms画面停顿人眼即可感知到

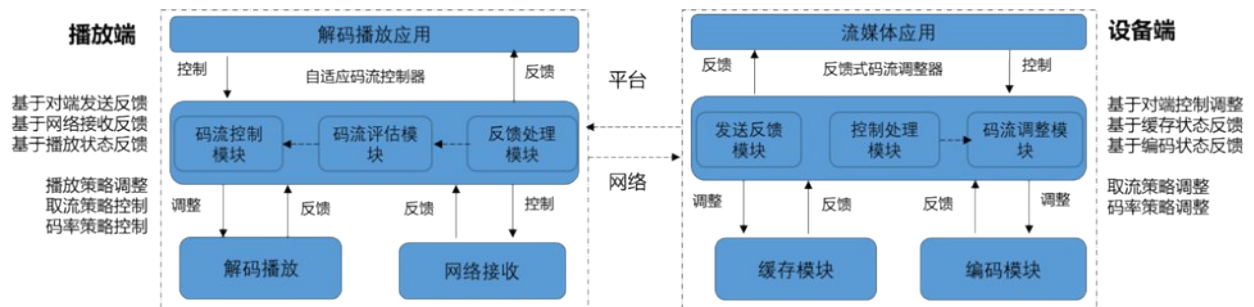


图5 端到端码流自适应控制方法

卡顿), 就会出现2次卡顿的现象, 由此精准的识别和定位到卡顿发生的时间点和卡顿持续的时长。

2) 网络质量检测方法

本方法基于视频帧丢帧情况和视频帧组延迟趋势(视频帧组从发送端到接收端所经历的端到端延迟变化趋势)的双重网络拥塞检测算法预估当前网络质量, 能够快速识别网络拥塞发生, 识别精度为帧级别。本方法高效利用视频I帧流量突发特性进行网络质量感知, 既不影响正常业务的数据传输, 又无需额外发送数据专门用以探测

网络状态, 节省了网络带宽流量成本。

其中, 视频帧组延迟梯度拥塞检测算法在谷歌拥塞控制(Google Congestion Control, GCC)基础上进行改进应用, 算法检测原理如图7所示。 $d(i)$ 是两个帧组之间的延迟变化(即 $d(i) = t(i) - t(i-1) - (T(i) - T(i-1))$), $d(i)$ 为0则网络没有拥塞, $d(i)$ 大于0则网络存在拥塞, $d(i)$ 小于0则网络拥塞正在恢复。

结合一次指数平滑预测算法和最小二乘线性回归算法, 将延迟梯度值进行累加、平滑和线性

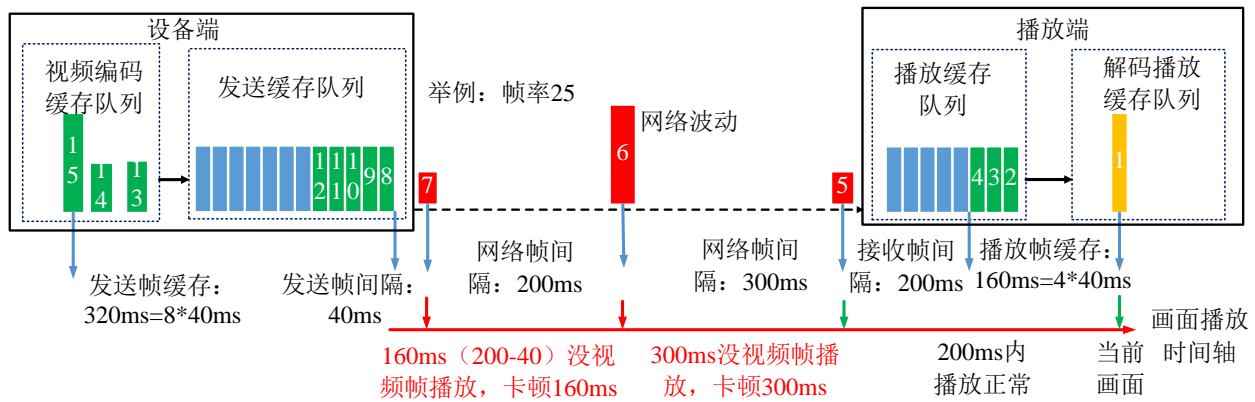


图6 视频帧级别卡顿检测方法

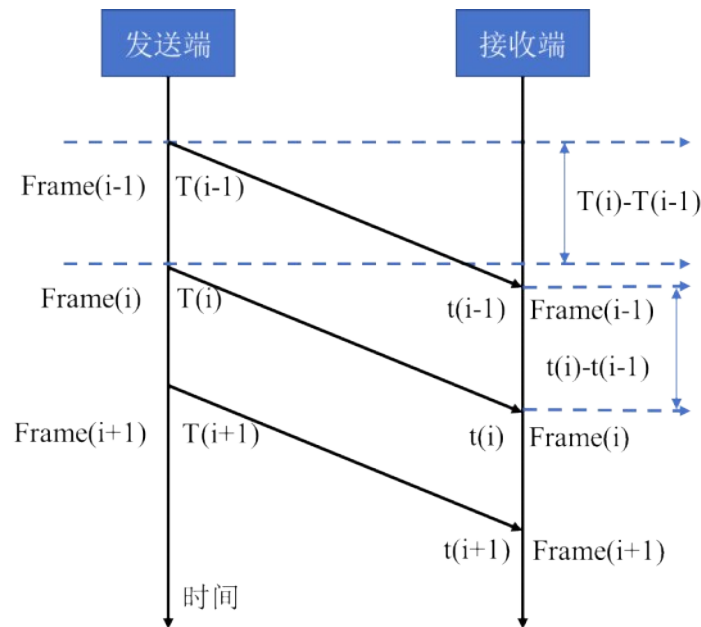


图7 视频帧级别网络拥塞检测



回归，得到延迟趋势值 $trend$ (也即后面的 $m(t_i)$)，通过该趋势值表征网络的拥塞程度。

(1) $0 < trend < 1$ ，视频帧延迟不断加大，网络节点设备缓冲队列长度持续增加，直到网络缓冲区被填满。

(2) $trend = 0$ ，视频帧延迟恒定，网络节点设备缓冲区队列长度不变。

(3) $trend < 0$ ，视频帧延迟不断减少，网络节点设备缓冲区队列长度不断减少，直到队列为空。

本方案定义了三种网络带宽的使用状态：Normal、Underuse、Overuse，即正常、轻载、过载。通过对调整后的延迟趋势值 $m(t_i)$ 和动态阈值 $\gamma(t_i)$ 进行比较，网络带宽使用状态的判定如图8所示：

可知，理论上网络带宽使用状态的判定方法为：

- (1) $m(t_i) > \gamma(t_i)$ ，处于 **overuse** 过载状态
- (2) $m(t_i) < -\gamma(t_i)$ ，处于 **underuse** 轻载状态
- (3) $-\gamma(t_i) \leq m(t_i) \leq \gamma(t_i)$ ，处于 **normal** 正常状态

理想的网络环境中，延迟趋势为0，而在实际的网络环境中，延迟梯度则是不断变化的，让阈值跟随延迟梯度的变化而进行动态调整，可以降低算法对延迟变化的敏感度。阈值自适应算法公式如下：

$$\gamma(t_i) = \gamma(t_{i-1}) + \Delta T k_r(t_i) (|m(t_i)| - \gamma(t_{i-1})) \quad (4)$$

其中， $\Delta T = t_i - t_{i-1}$ ，代表视频帧组到达时间差，即距上一次阈值更新的时间差。 $k_r(t_i)$ 代表阈值的增长率 (有可能负增长)，增长的基准值是当前调整后的延迟梯度趋势值与当前阈值的差 ($|m(t_i)| - \gamma(t_{i-1})$)。 $k_r(t_i)$ 系数按如下公式取值：

$$k_r(t_i) = \begin{cases} k_d & |m(t_i)| < \gamma(t_{i-1}) \\ k_u & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

k_d 和 k_u 决定了阈值的减少和增加的速度。当延迟趋势斜率值处于 $-\gamma(t_i) \leq m(t_i) \leq \gamma(t_i)$ 时，要降低阈值，否则，要升高阈值。阈值动态调整的原则是： $\gamma(t_i)$ 跟随 $m(t_i)$ 变化， k_d 和 k_u 的推荐值分别是 0.039 和 0.002。

本技术方案定义了三种码率控制状态：不变、上调、下调。码率控制状态和过载检测信号之间的切换如下表1所示，最终通过该码率的控制状态来反馈当前视频传输网络质量情况。

表1 码率控制状态切换

| 当前状态 网络信号 | 不变 | 上调 | 下调 |
|--------------|----|----|----|
| 过载 | 下调 | 下调 | - |
| 正常 | 上调 | - | 不变 |
| 轻载 | - | 不变 | 不变 |

3 无线视频跨层传输与码率自适应技术效果验证

3.1 跨层传输优化技术效果验证

本文对无线视频跨层传输与码率自适应技术在实际模拟场景中的应用进行了测试验证。其

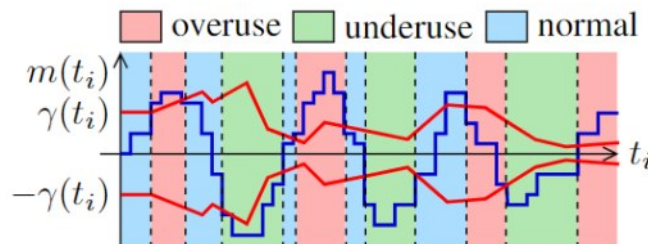


图8 网络过载检测机制

中，跨层传输优化技术分别使用单目和双目摄像机（用于测试实际多见的多通道码流竞争场景）进行对比测试，整体测试环境如图9所示。对比测试跨层传输优化技术实施前后的实时视频播放效果，特别是在无线弱信号场景下的实时预览效果。其中，信道仿真仪用于模拟终端设备实际使用的无线场景，比如穿墙、拉距和干扰等用户使用环境。

信道仿真仪模拟“室内隔三堵墙（1厚2薄）+10m”用户使用场景进行测试，单目设备视频码率为2Mbps。单目设备总网络传输速率对比测试结果如图10所示，设备实施跨层优化技术后，平均总网络传输速率提升42%-56%，且优化后传输速率稳定，视频播放流畅。

信道仿真仪模拟“室内隔一堵厚砖墙+3m”

用户使用场景进行测试，双目设备每个通道视频码率为2Mbps，总码率为4Mbps。双目设备每个通道的网络传输速率对比测试结果如图11和图12所示，总网络传输速率对比测试结果如图13所示。设备实施跨层优化技术后，平均总网络传输速率提升33%-52%，且优化后传输速率稳定，通道1和通道2网络传输公平性好，视频播放流畅。

信道仿真仪模拟的所有测试场景和设备不同视频码流传输性能对比数据如表2和表3所示，该技术实施后整体网络传输性能提升明显，视频播放从卡顿改善为流畅。

测试验证表明，跨层传输优化技术能够快速感知无线网络信号变化，在拥塞控制的起始阶段和快速恢复阶段可以加快数据传输，在拥塞避免



图9 跨层传输优化技术测试环境

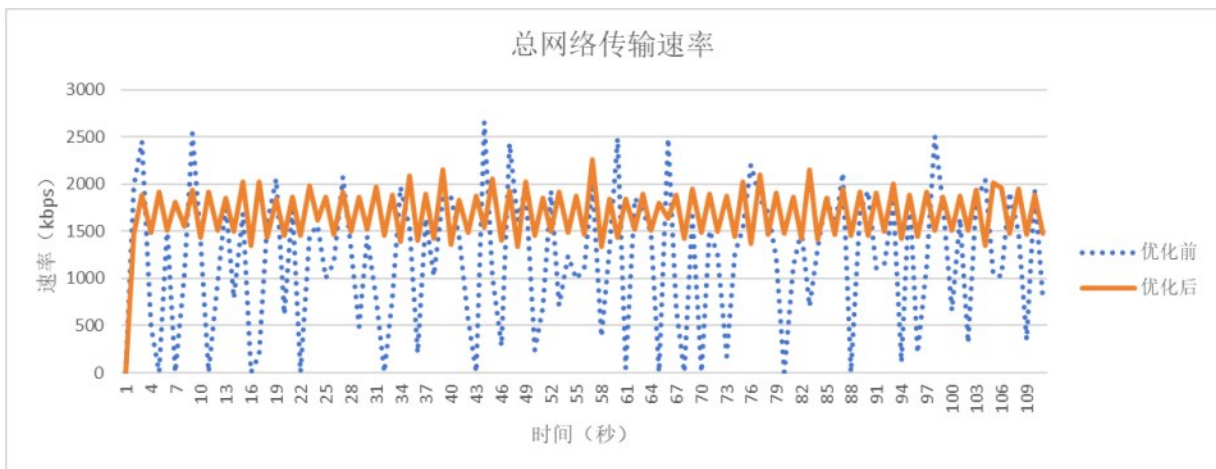


图10 单目设备总网络传输速率

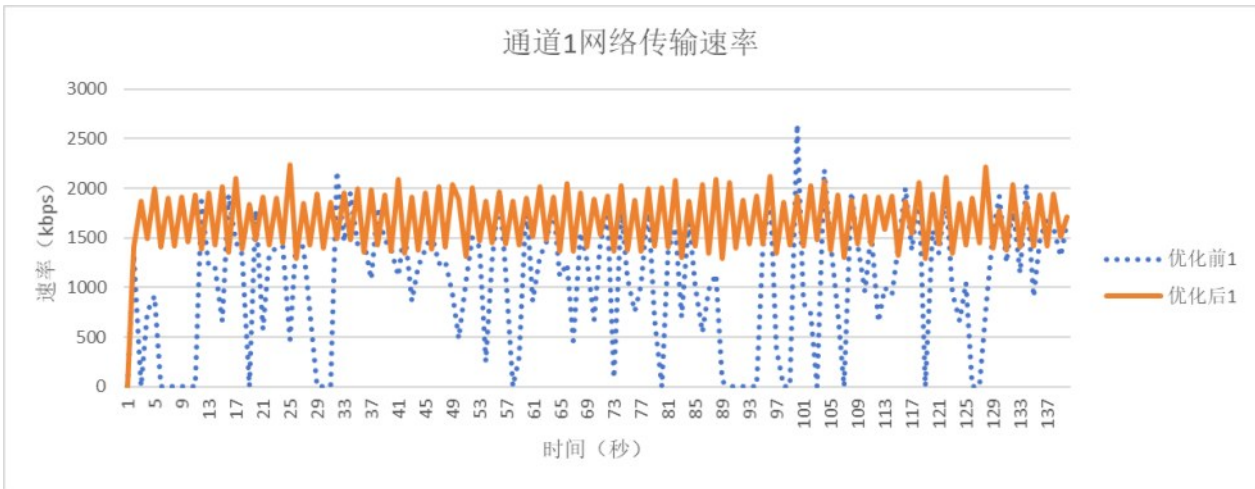


图11 双目设备通道1网络传输速率

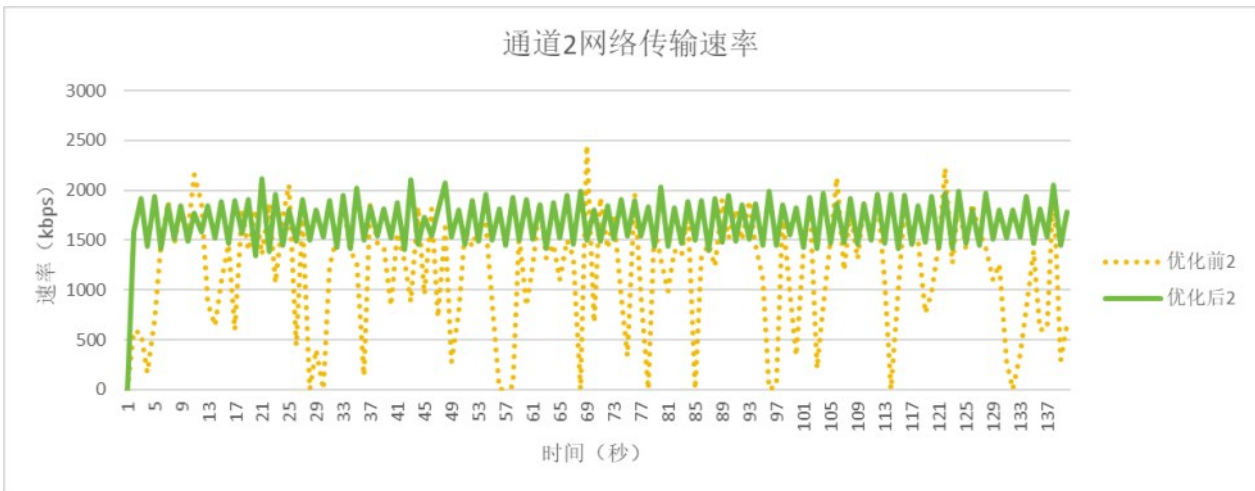


图12 双目设备通道2网络传输速率

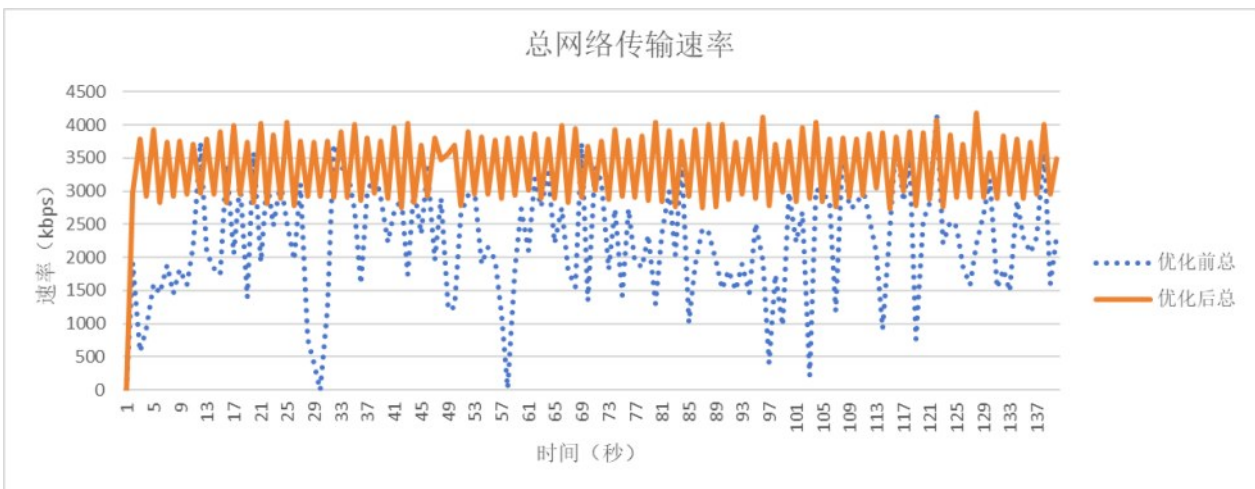


图13 双目设备总网络传输速率

表2 无线弱信号单目设备测试结果

| 模拟场景 | 视频码率 | 优化前(kbps) | 优化后(kbps) | 性能提升 |
|-------------------|-------|-------------------|------------|---------|
| 室内隔一堵厚砖墙+3m | 4Mbps | 2954-3220 卡顿 | 3465 流畅 | 7%-17% |
| 室内隔两堵砖墙 (1厚1薄)+6m | 4Mbps | 2633-3301 卡顿 | 3457 流畅 | 4%-31% |
| 室内隔三堵墙 (1厚2薄)+10m | 2Mbps | 1118-1230 严重卡顿 | 1753 流畅 | 42%-56% |

表3 无线弱信号双目设备测试结果

| 模拟场景 | 视频码率 | 优化前(kbps) | 优化后(kbps) | 性能提升 |
|-------------------|------------|-------------------|-----------------|---------|
| 室内隔一堵厚砖墙+3m | 每目2Mbps,2路 | 1146-1317 严重卡顿 | 1752-1752 流畅 | 33%-52% |
| 室内隔两堵砖墙 (1厚1薄)+6m | 每目2Mbps,2路 | 1424-1451 严重卡顿 | 1744-1751 流畅 | 20%-22% |

阶段可以准确且快速匹配当前网络拥塞窗口大小，减少传输层数据的超发。同时，设备端采用基于无线接收信号强度和无线协商速率信息进行网络层传输拥塞控制，实施成本低，公平性好，能够适用于多目设备接入无线热点同时进行视频传输，能够改善因无线拥塞感知不及时和拥塞窗口调控不精准导致的网络传输时延增加和丢包率突增等问题。

3.2 端到端码流自适应技术效果验证

端到端码流自适应技术测试环境如图14所示，测试设备最大码流为2Mbps，最小码流为512kbps。通过对比测试端到端码流自适应技术

实施前后的实时视频播放效果，特别是在网络带宽受限场景下的实时预览效果。其中，网络损伤仪用于模拟终端设备带宽受限的网络环境。

测试通过网损仪模拟网络带宽波动场景（包括带宽不足、临界带宽和带宽充足），测试结果如表4和表5所示，该技术能够实现网络带宽低于终端设备码率时，6秒内完成终端设备视频编码码率的自适应调整，整个码流调整过程画面连续、视频流畅，正常网络视频出流速度提升10%，带宽不足场景提升52%。

3.3 整体应用效果

在实际业务场景中，结合应用跨层传输优化

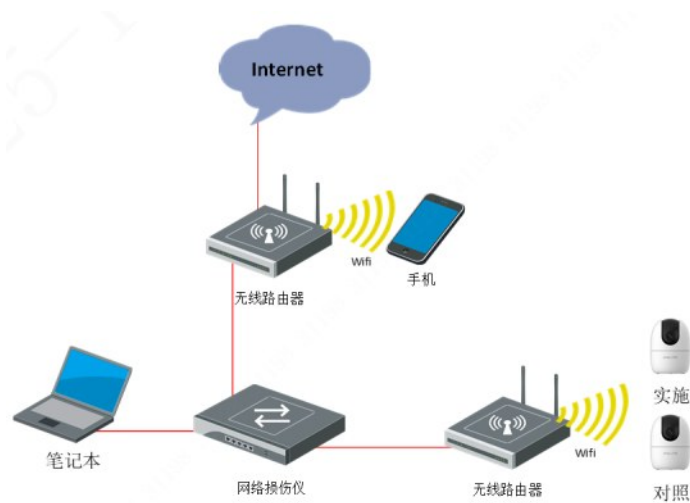


图14 端到端码流自适应技术测试环境



表4 网络带宽波动视频播放测试结果

| 对比指标 | 端到端码流自适应 | 无自适应技术 |
|---------|----------|---------|
| 网络感知速度 | 2秒-6秒 | 无 |
| 视频播放流畅度 | 流畅、画面连续 | 卡顿、画面停止 |

表5 网络带宽波动出流速度测试结果

| 网络环境 | 端到端码流自适应 | 无自适应技术 |
|------|----------|--------|
| 正常网络 | 0.82秒 | 0.91秒 |
| 带宽不足 | 1.36秒 | 2.83秒 |

技术和端到端码流自适应技术，进行整体效果验证。如图15所示，设备通过无线网络接入物联网云平台，用户手机通过云平台获取设备视频播放，测试时长2分钟，应用效果性能指标说明如

表6所示。

通过实际场景应用效果测试，测试结果数据如图16和图17所示，该技术能够在无线弱信号下改善业务出画面速度、提升视频清晰度、降低视频卡顿和画面时延，能够保障客户视频流畅播放体验。

4 结束语

本文提出了一种基于网络与业务联合感知的无线视频跨层传输与码率自适应技术方案，通过跨层传输优化与端到端码流自适应两项核心技术，实现了动态无线环境下的高效、稳定视频传

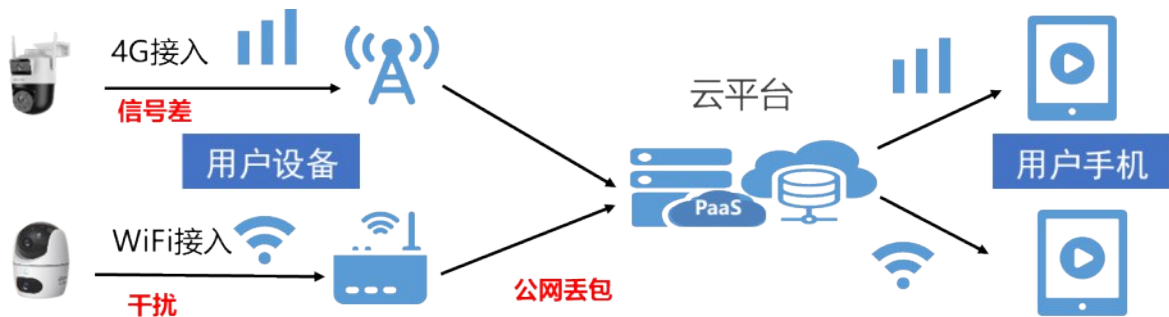


图15 应用场景效果验证

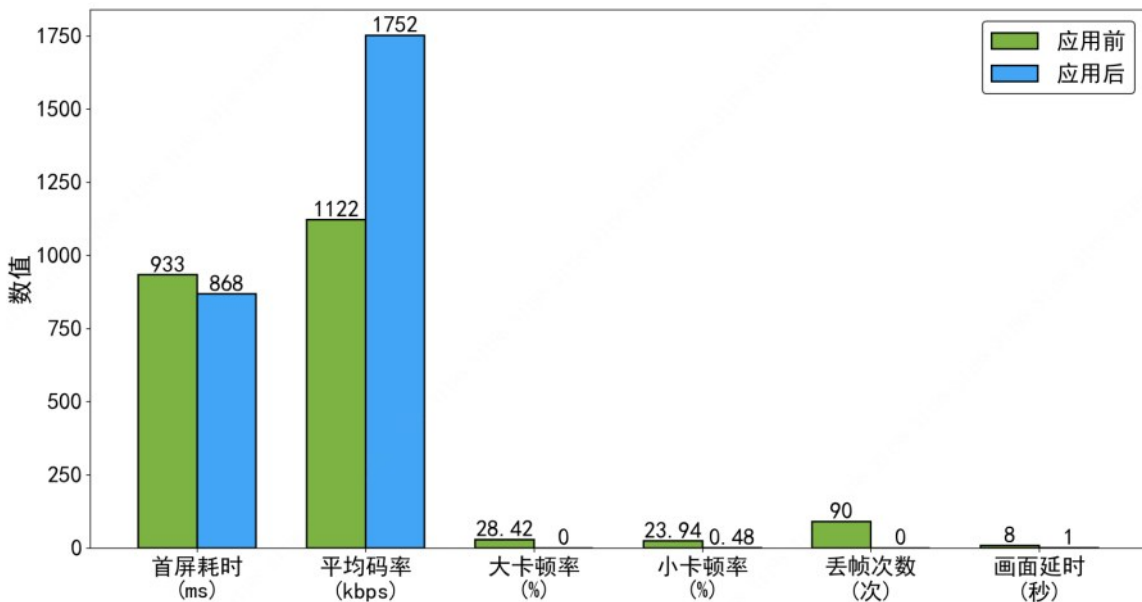


图16 WiFi设备弱信号应用场景性能指标对比
设备最大码率为2Mbps, H265视频编码, 帧率15fps

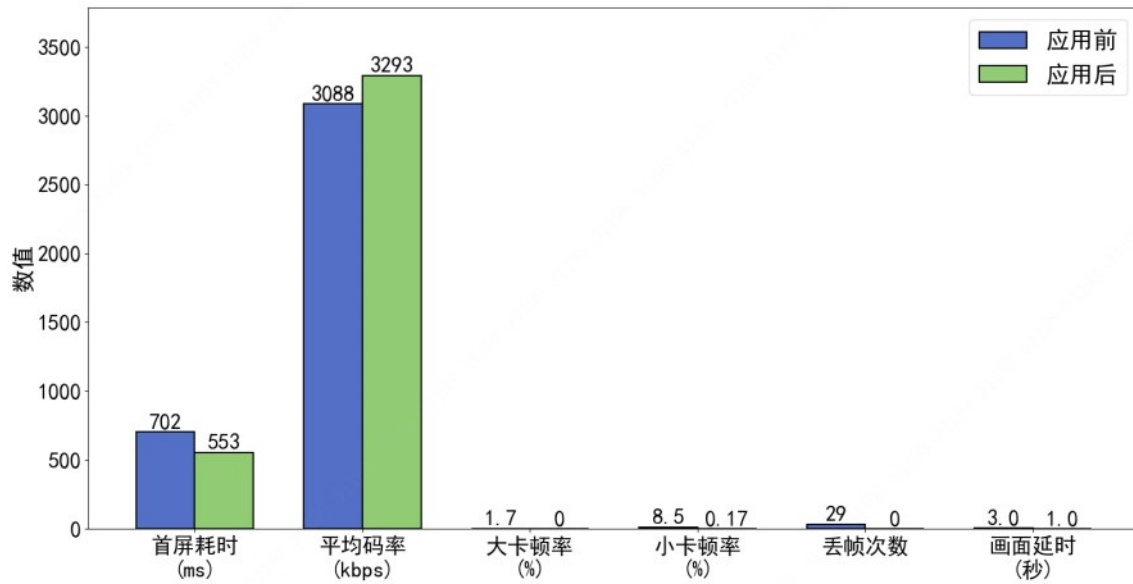


图 17 4G 设备弱信号应用场景性能指标对比
设备最大码率为 4Mbps, H265 视频编码, 帧率 15fps

表 6 应用效果性能指标说明

| 性能指标 | 单位 | 说明 |
|--------|------|--|
| 视频首屏耗时 | 毫秒 | APP 发出播放请求到收到播放出设备画面的整个过程耗时 |
| 视频平均码率 | Kbps | 视频接收累计数据量/播放视频总时长 |
| 视频大卡顿率 | % | 视频卡顿 1500 毫秒以上的累计时长/播放视频总时长×100% |
| 视频小卡顿率 | % | 视频卡顿 150-1500 毫秒之间的累计时长/播放视频总时长×100%，150 毫秒以下的卡顿，人眼感觉不明显故不计入卡顿 |
| 视频丢帧次数 | 次 | 网络传输过程发生视频丢帧事件的累计次数 |
| 最大画面延时 | 秒 | 视频端到端画面延时最大值 |

输。跨层传输优化技术通过在设备端实时感知无线网络状态，动态计算无线拥塞窗口，并与传统拥塞控制机制协同决策，精准调控视频包发送调度，显著提升无线链路带宽利用率，降低传输时延与丢包风险。端到端码流自适应技术通过播放端与设备端的双向协同，构建基于网络状态与播放质量的双重检测机制，结合播放缓冲状态分析与网络延迟趋势预测，实现帧级卡顿识别与拥塞预警，动态调整视频编码码率，在 6 秒内快速响应带宽波动，保障画面连续性与播放流畅性。

实验结果表明，该方案在无线网络发生拥塞或恢复过程中，能够快速调整数据发送速率，有效应对延迟突增与丢包率上升等典型问题，显著

改善传输性能。整体上，本方案在复杂时变的 5G、Wi-Fi 6 等新兴无线网络环境下，实现了低时延、高可靠、自适应的视频传输能力，为数字安防、工业监控、应急通信等高价值智能视觉服务提供了坚实的技术支撑，具备良好的实用价值与推广前景。

参考文献:

- [1] 穆晓铎,马轩,徐鹏. 基于 GB 35114 标准的无人机无线视频传输研究与应用[J]. 警察技术,2024,(05):22-24.
MU X D, MA X, XU P. Research and application of UAV wireless video transmission based on GB 35114 standard[J]. Police Technology, 2024, (5): 22-24.
- [2] 李彦,万征,邓承志,等. 基于 IcD-FDRL 的应急监控视频边缘智能传输优化[J]. 北京航空航天大学学报,2025,51(07):2314-



- 2329.
- LI Y, WAN Z, DENG C Z, et al. Edge intelligent transmission optimization for emergency monitoring video based on IcD-FDRL[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(7): 2314-2329.
- [3] 武忠. 无线视频传输技术在矿山中的应用[J]. 自动化应用, 2018,(10):157-158.
- WU Z. Application of wireless video transmission technology in mines[J]. Automation Application, 2018, (10): 157-158.
- [4] 陈雪婷. 基于 5G 传输与边缘计算的超高清远程协同制作系统架构研究[J]. 中国信息化,2025,(11):110-111.
- CHEN X T. Research on architecture of ultra-high definition remote collaborative production system based on 5G transmission and edge computing[J]. China Informatization, 2025, (11): 110-111.
- [5] ZHANG W Y, ZHADALLY S, ZHANG H J, et al. Improving the QoE of real-time video transmission: a deep lossy transmission paradigm[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2025, 14(2): 69-76.
- [6] 杜玄宁, 李莹琦, 李英哲, 等. SwinAT-VSC: 面向视频语义传输的联合信源信道编码架构[J]. 无线电通信技术, 2025:1-7.
- DU X N, LI Y Q, LI Y Z, et al. SwinAT-VSC: joint source-channel coding architecture for video semantic transmission[J]. Radio Communications Technology, 2025:1-7.
- [7] 李彦, 万征. 深度强化学习在边缘视频传输优化中的应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2025,61(04):43-58.
- LI Y, WAN Z. Survey on application of deep reinforcement learning in edge video transmission optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(4): 43-58.
- [8] 吴俊杰, 罗雷, 朱策, 等. 面向智能反射面辅助的无线视频传输联合资源优化算法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(8): 2630-2641.
- WU J J, LUO L, ZHU C, et al. Joint resource optimization algorithm for wireless video soft transmission assisted by intelligent reflecting surface[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2025, 47(8): 2630-2641.
- [9] 张李高. 5G 网络环境下数字视频传输稳定性增强技术关键点研究[J]. 中国宽带, 2026, 22(1): 33-35.
- ZHANG L G. Research on key points of digital video transmission stability enhancement technology in 5G network environment[J]. China Broadband, 2026, 22(1): 33-35.
- [10] YU W, WEIJIA H, XIAO M, et al. Cross-layer optimization-based asymmetric medical video transmission in IoT systems [J]. Symmetry, 2022, 14(11): 2455.
- [11] MAO H Z, NETRAWALI R, ALIZADEH M. Neural adaptive video streaming with Pensieve[J]. Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems, 2017, 1(1): 1-24.
- [12] ZHANG H H, ZHOU A F, LU J M, et al. OnRL: improving mobile video telephony via online reinforcement learning[C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). New York: ACM, 2020: 1-14.
- [13] PALMER M, APPEL M, SPITERI K, et al. VOXEL: cross-layer optimization for video streaming with imperfect transmission[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT). New York: ACM, 2021: 1-16.
- [14] SOUANE N, BOURENANE M, DOUGA Y. Deep reinforcement learning-based approach for video streaming: dynamic adaptive video streaming over HTTP[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11697.
- [15] ZHANG J W, HAN Y, CAI Z Y, et al. Wavelet transform and GRU-enhanced deep reinforcement learning for adaptive bitrate control in video streaming[C]//Proceedings of 2025 5th International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Technology Applications (AIITA). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [16] RAJPUROHIT A, KELLEY M, WANG W, et al. BALANCE: bitrate-adaptive limit-aware netcast content enhancement utilizing QUBO and quantum annealing[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.

[作者简介]



钟广海 (1989-), 男, 高级工程师, 大华股份中央研究院资深工程师, 主要研究方向为无线流媒体与智能网络传输技术研究及应用, 授权发明专利 20 余项, 参与过多项国家级和省级项目。



姜哲华 (1982-), 男, 高级工程师, 国家级工业设计中心副主任、省重点实验室研究员, 主要研究方向为多维感知前沿技术, 主持/参与过 10 项国家/省部级重大科研项目, 主导 3 项标准制定, 并获得专利申请 40 余项。



叶奇 (1985-), 通信作者, 男, 大华股份中央研究院流媒体实验室技术总监, 重点实验室方向带头人, 主要研究方向为超高清视频解码、5G 和 WiFi 流媒体传输等领域创新技术及应用, 参与多项国家级和省

级项目。



符哲蔚（1988-），男，正高级工程师，大华股份中央研究院系分专家，主要研究方向为视频领域创新技术的应用及方案设计，参与5项国家/省部级重大科研项目，组织开展视频网络技术创新近10项，主导参与10余项标准和白皮书制订。



张朝阳（1973-），男，浙江大学求是特聘教授、二级教授，国家卓越工程师学院副

院长，全省多模态通信网络与智能信息处理重点实验室主任，中国通信学会会士。主要研究领域涉及感知、通信与计算前沿交叉理论与技术，承担和完成国家项目和课题20余项，发表论文500余篇，被引近2万次。

邓志吉（1985-），男，正高级工程师，省重点实验室副主任，主要研究方向是视频基础技术和新一代无线网络技术，主持/参与过7项国家/省部级重大科研项目，项目总金额超过6亿。