

文章编号: 2095-4980(2023)01-0082-06

基于层修复技术的 DVC 鲁棒传输框架

杨 红, 卿 粼波, 何小海, 王 林, 丁 灏雲

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 针对分布式视频编码(DVC)系统鲁棒传输问题, 设计了一种基于层修复的 DVC 系统传输框架。该传输框架首先对关键帧(K 帧)同时采用高效视频编码(HEVC)帧内编码和 Wyner-Ziv 编码, 并将校验信息(Wyner-Ziv 码流)作为修复层码流存入缓存中。若当前关键帧有丢失, 则向编码端请求该帧对应的层修复码流, 在解码端对错误块进行修复, 获得关键帧解码质量的提升。同时, 研究了层修复码率估计算法, 利用已成功解码的位平面辅助完成算法重建。实验结果表明, 该传输框架利用关键帧的层修复码流对关键帧失真部分进行了修复, 提高了关键帧质量, 改善了边信息质量, 实现了 DVC 的鲁棒传输。

关键词: 分布式视频编码; Wyner-Ziv 编码; 关键帧; 鲁棒传输; 修复层

中图分类号: TN919.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020440

The robust transmission scheme of Distributed Video Coding based on the repair layer

YANG Hong, QING Linbo, HE Xiaohai, WANG Lin, DING Haoyun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Aiming at the problem of robust transmission in Distributed Video Coding(DVC) system, a DVC system transmission framework based on layer restoration is designed. Firstly, this transmission framework uses the High Efficiency Video Coding(HEVC) frame encoding and Wyner-Ziv coding to encode Key frames(K frames) respectively, and the checking information(Wyner-Ziv codes) is stored in the cache as a layer repair code stream. If the current Key frame is lost, the corresponding layer repair code stream of the frame is requested at the encoding end, and the error block is repaired at the decoder end to obtain the improvement of Key frame decoding quality. At the same time, the algorithm of layer repair coding rate estimation is also studied and the successfully decoded bit plane is employed to complete the algorithm reconstruction. The experimental results show that the transmission framework takes advantage of layer repair code stream of Key frame to repair the distortion part of Key frame. The qualities of Key frame and side information are improved(for example, when the "Kendo" sequence is lost by 5%, the Peak Signal-to-Noise Ratio(PSNR) is increased by 3.5 dB at the bit rate of 1 000 kbps), so as to realize the robust transmission of distributed video coding system.

Keywords: Distributed Video Coding; Wyner-Ziv video coding; Key frame; robust transmission; repair layer

分布式视频编码(DVC)系统基于分布式信源信道联合编码(Distributed Joint Source Channel Coding, DJSCC)框架, 具有固有的传输鲁棒性, 非常适用于便携式、低存储器容量、低功耗、计算受限的终端^[1]; 由于 DVC 系统中关键帧(K 帧)的解码质量除了影响自身重建质量外, 还影响边信息质量, 因此至关重要。

为了提升 DVC 系统的传输性能, 已有研究者开展了相关研究。Weerakkody 等^[2]对易错的无线信道下最大似然比解码器进行了研究; 华玲等^[3]从实际应用方面展开了基于朴素贝叶斯分类的 DVC-HEVC 快速转码算法研究; Zhang 等^[4]提出了具有上下文自适应平滑先验的马尔可夫随机场算法, 提升了 DVC 的重建性能。此外, 为了提升

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871278); 国家军工委资助项目(2019-JCJQ-JJ-406)

无线环境下 DVC 解码的抗噪性能, 杨瀚成^[5]提出了基于无线传输结构的 DVC 优化解码算法; 李军^[6]为对视频传输过程中因丢包而产生的传输失真进行估计, 在解码端选用更适合的差错隐藏修复算法。Yuan 等^[7]利用时域差错隐藏算法对无线信道下传输视频帧进行了修复, 但还是存在某些帧质量有损失的情况。

为了提升 DVC 系统的整体率失真特性, 本文从减少差错隐藏后仍存在的失真出发, 在项目组前期成果^[8]的基础上, 设计了 DVC 系统中 K 帧层修复方案, 实现了 DVC 的鲁棒传输。首先介绍 K 帧丢失时的层修复传输框架和完整的 DVC 传输模型; 然后对该鲁棒传输框架进行测试。测试结果显示, 该框架提升了 K 帧的解码质量, 压缩了 Wyner-Ziv(WZ)帧的码率, 实现了易丢失信道中 DVC 系统整体率失真(Rate Distortion, RD)性能的提升。

1 DVC 系统中 K 帧层修复技术

DVC 在编码端采用独立编码方式, 消除了编码端预测回路, 并凭借编码端设计的信道码固有的鲁棒性, 使系统获得了优于传统视频编码的传输特性。基于 DJSCC 框架的 DVC 传输模型如图 1 所示。

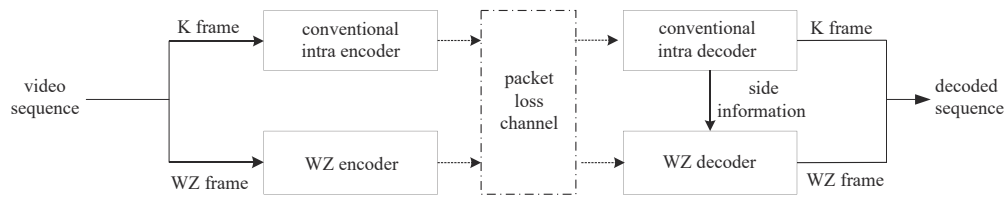


Fig.1 Transmission model of DVC

图 1 DVC 传输模型

受图 1 传输模型的启发, 本文设计了一种基于 DJSCC 框架的 K 帧层修复技术, 如图 2 所示。K 帧的传统帧内编码方法采用 HEVC 帧内编码, 码流经过误码信道传输后, 接收端解码时可能需要进行差错隐藏处理, 后续层修复技术可进一步解决 K 帧在传输过程中可能存在的误码或丢包问题。

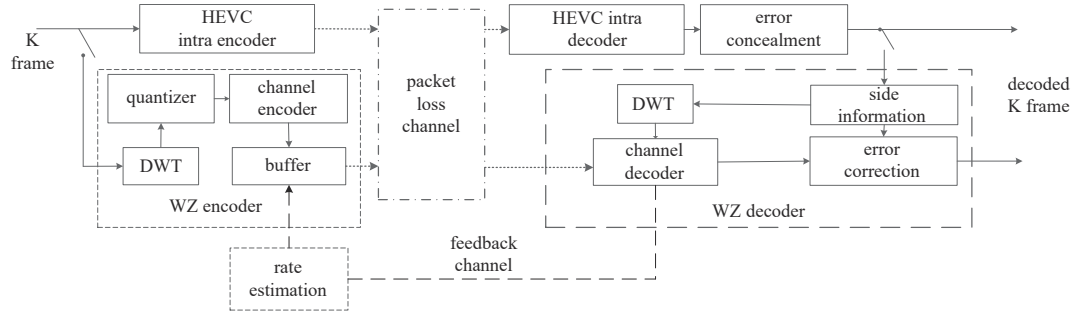


Fig.2 Proposed repair layer of K frame

图 2 本文 K 帧层修复传输技术

图 2 所示的 K 帧层修复传输框架工作原理如下:

1) 编码端: K 帧分别进行 HEVC 帧内编码和 WZ 编码。WZ 编码时, 先对图像进行离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT), 变换后的各子带系数被量化; 然后对量化后的数据段提取比特面, 对比特面进行信道编码; 编码完成后, 将 HEVC 码流送入无线信道, WZ 码流(层修复码流)存储在缓冲区内。

2) 解码端: 首先判断收到的 K 帧 HEVC 码流有无丢包, 若无丢包, 仅对 K 帧进行帧内解码重建即可, 且删除缓存的修复层码流; 若有丢包, 则采用传统错误掩盖技术对接收的 HEVC 视频码流解码, 重建出一幅质量受损图像, 然后进行差错隐藏, 获得质量好一点的图像, 并将该图像作为当前 K 帧的边信息; 最后边信息经过相同的 DWT 变换、量化和比特面提取后, 得到与当前 K 帧比特面对应的边信息比特面数据, 结合层修复码流进行信道解码, 对 K 帧实现纠错重建。

在 DVC 系统中, 解码端边信息生成环节的计算复杂度高, 而本文层修复传输框架的边信息就是 HEVC 解码后经过差错隐藏的图像, 并没有经过高复杂度的运动估计, 因此不会过多增加解码端的复杂度。

观察发现, 在层修复结构中有 2 个 DJSCC 方案, 则其率失真函数可定义为:

$$E_{xx'}\left(D\left(X, Dec\left(Z, Dec\left(Y', Z'\right)\right)\right)\right) \leq E_{xx'}\left(D\left(X, Dec\left(Z, Y'\right)\right)\right) \quad (1)$$

式中: X 为原始信源, 如图 2 框架中的 K 帧; Y' 为解码端获得边信息, 如图 2 框架中生成的边信息; Z 为第一个

JSCC 方案解码端重建的信源； Z' 为第二个 JSCC 方案解码重建的信源，如图 2 框架中的帧内解码 K 帧结果。

虽然该方案的失真有所减少，但在 WZ 编解码框架中若采用反馈重传的传输机制，则会大大增加 DVC 系统的延时。因此，本文详细研究在层修复传输框架中如何结合信道条件进行码率估计，减少系统反馈重传的次数，进而减少系统延时^[9]。

若 K 帧无丢失时，不用考虑其修复层的传输，此时无码率估计问题；若 K 帧有丢失，则需进行 WZ 码流的层修复，设计合理的修复层码率估计算法^[10]。K 帧丢失时，边信息为当前有丢失 K 帧的差错隐藏后解码帧，导致 WZ 解码框架中边信息质量下降。当前帧与它的边信息之间的噪声分布通常可利用拉普拉斯分布进行描述^[11]，则信源 X 和边信息 Y 之间满足：

$$f_{X|Y}(x|y) = \frac{\beta}{2} e^{-\beta|x-y|} \quad (2)$$

式中： x 表示当前 K 帧； y 表示有丢失的当前 K 帧； β 为拉普拉斯分布参数，可以通过 x 和 y 之间的方差 σ^2 得到：

$$\sigma^2 = E[(x-y)^2] - E[(x-y)]^2 \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

实际上每次解码完，小波域的低频子带就可获得该分解层的方差。此时可以在小波域对不同频带进行拉普拉斯参数的估计，然后根据 WZ 帧丢失时码率估计算法^[6]，同理推导出 K 帧丢失时修复层码率估计公式：

$$R_{est-l}^j = (1 + \alpha + \beta) R_{min}^j + j \times k \quad (5)$$

$$R_{est-h}^j = (1 + \alpha + \beta) R_{min}^j + (j + M \times t + lev + band) \times k \quad (6)$$

式中： t 为丢失率； lev 表示所属小波子带的信息； $band$ 表示该子带内的第几个比特面；其他参数可参考文献[6]的解释。

在易丢失无线信道中，结合图 1 和图 2，可构成本文所描述的 DVC 层修复鲁棒传输框架，其详细工作流程如下：

- 1) 当前 WZ 帧通过 WZ 编码器进行 DWT、量化、并行重复累加码编码，获得奇偶校验位。
- 2) 根据作为边信息的前向帧与当前帧之间的相关性，结合当前信道条件，WZ 编码器可估算出成功解码所需的码率，然后获得对应码率下的打孔掩模，从而实现码率自适应的并行重复累加码的校验位信息，并传输至解码端。
- 3) K 帧采用 HEVC 帧内编解码的全 I 帧方式。
- 4) 与此同时，K 帧也经过 WZ 编码器获得用于层修复的 WZ 比特流，并保存在缓冲器中。根据反馈的不同信道条件，WZ 编码器可获得当前信道的丢失率，进而估计出修复层码率。
- 5) 解码器接收到 HEVC 码流，可确定是否有信息包已经丢失。如果无丢包，该视频流不用进行层修复，直接由 HEVC 帧内解码器重构；如果存在丢包，K 帧经由帧内解码重建后，首先进行差错隐藏，再进行层修复。

2 实验仿真与分析

2.1 实验设置

本文提出的基于层修复技术的 DVC 系统鲁棒传输框架，其中 K 帧通过 HEVC 帧内编码，量化步长设置为 {24, 28, 32, 36}；WZ 帧的量化步长设置为 {5, 10, 15, 20}^[12]。测试选择 DVC 标准测试视点的‘Kendo’ (256×192, 30 bps) 序列视点 1，仿真实验对每个视频序列的前 100 帧进行测试，并只考虑亮度信息。实验首先进行修复层码率估计算法测试，随后验证层修复机制对 K 帧的丢失是否有修复作用；然后测试在该层修复机制下对 WZ 帧传输性能的影响；最后考察基于层修复的 DVC 系统的整体 RD 性能。

2.2 修复层码率估计测试及分析

K 帧无丢失时，WZ 帧前 50 帧的码率估计结果如图 3 所示，为节约篇幅，实验结果只给出了量化步长为 5 时各序列码率的比较，其他量化步长有相似的统计结果。图中横坐标表示各帧序号，纵坐标表示码率值。图中分别给出了最低码率值、实际码率值和估计码率值，其中估计码率值利用式(5)~(6)计算获得。从图 3 可以看出，在量化步长为 5 时，对于‘Kendo’序列，估计的码率比实际码率要高大约 100 kbps，这是由视频帧的尺寸大小不同

所致。同时可以看出, 实际解码所需的码率一般会高于最低码率, 因此在码率估计时, 通常需在最低码率的基础上做出调整, 估计得到的码率越接近实际码率, 效果越好。然而同一个算法不可能保证所有的比特面分配的码率都准确, 且边信息质量的影响也可能造成部分比特面过估计或欠估计。码率高估不会影响解码质量, 但码率低估会导致解码出错, 因此估计得到的总码率都高于实际码率。

2.3 K 帧传输质量测试及分析

本实验主要考察 K 帧有丢失时本文层修复方案的效果。首先设置所有视频帧都为 K 帧, 量化步长设置为 28, 且 HEVC 帧内编码的码流通过分组网络传输, 信道丢失率为 10%。传输中信道丢失对系统整体性能的影响通过解码端重建帧的 PSNR 值来衡量。各测试序列前 20 帧的 PSNR 值如图 4 所示, PSNR 曲线的上边界由本文框架^[8]无丢失条件测得; 传统错误掩盖算法^[7]表示有丢失时, 解码端初次重建视频帧的质量; 本文层修复表示经过差错隐藏算法后再进行 WZ 码流纠错保护的 video 帧重建质量。使用传统错误掩盖算法的 PSNR 值出现了显著的振荡并明显降低; 相比之下, 采用本文层修复方案的 video 帧重建质量有明显提升, 本文算法的 PSNR 值更接近于无丢失的条件。

为全面体现本文层修复方案的效果, 图 5 为不同修复方案下 K 帧的 RD 曲线。观察测试结果可见, 当只进行错误掩盖^[7]修复后, 测试序列 PSNR 值随着丢失率的升高而显著下降; 本文方案, 由于修复层的保护提升了序列的 PSNR 值, 如: 丢失率为 5% 时, ‘Kendo’ 序列在 400 kbps 条件下 PSNR 有 9.5 dB 的提升, 观察其余序列的测试图可得到类似结论。由此可见, 采用 WZ 码流作为 K 帧层修复的传输方案具有实现 DVC 系统视点内鲁棒传输的功能。

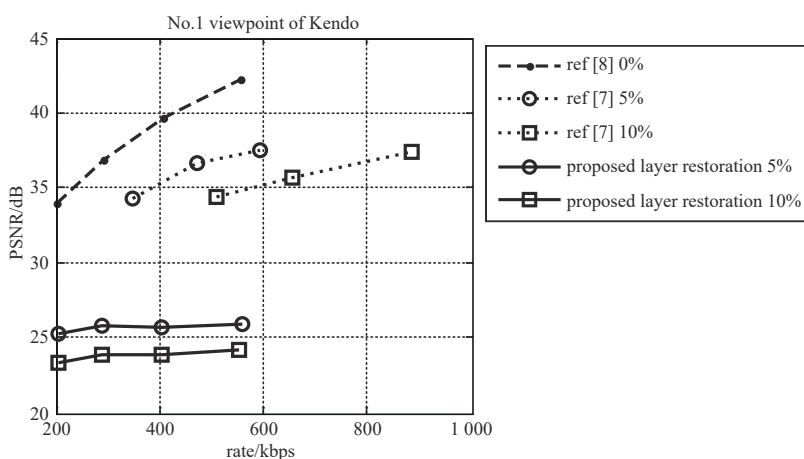


Fig.5 RD curves of of K frame under different repair schemes

图 5 不同修复方案下 K 帧的 RD 曲线

图 6 为 ‘Kendo’ 序列视点 1 第一帧在有无丢失及有无层修复前后的主观对比图。实验设置 HEVC 帧内编码码流的丢失分别为 1%, 5% 和 10%, 图 6(a) 为无丢失时的 ‘Kendo’ 序列视点 1 第一帧原始图, 图 6(b) 中红色框内为丢失 1% 后经传统错误掩盖^[7]算法修复后的结果, 此时比较模糊, PSNR 值为 29.974 1 dB, 与原始图像差距较大; 图 6(b1) 中红色框内是丢失 1% 后经本文层修复后的结果, PSNR 值为 36.825 1 dB, 此时与原始图像接近; 其他丢失率下的对比结果也体现了修复前后视频帧质量的提升。

2.4 WZ 帧传输质量测试及分析

为了测试 K 帧层修复传输方案对 WZ 帧传输性能的影响, 本实验 HEVC 的帧内量化步长设置为 28, 并在相同的信道条件下与无层修复进行对比, 结果如图 7 所示。

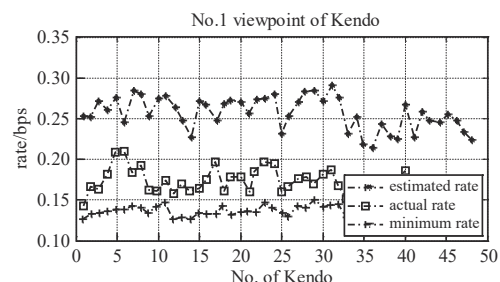


Fig.3 Code rate of ‘Kendo’ sequence when the loss rate is 0%

图 3 K 帧无丢失时 ‘Kendo’ 序列的码率估计值

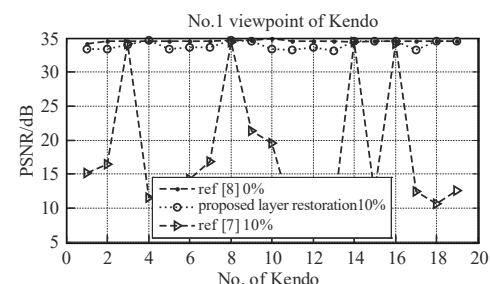


Fig.4 Reconstruction quality of ‘Kendo’ sequence when the loss rate is 10%

图 4 丢失率为 10% 时, ‘Kendo’ 序列的视频帧质量

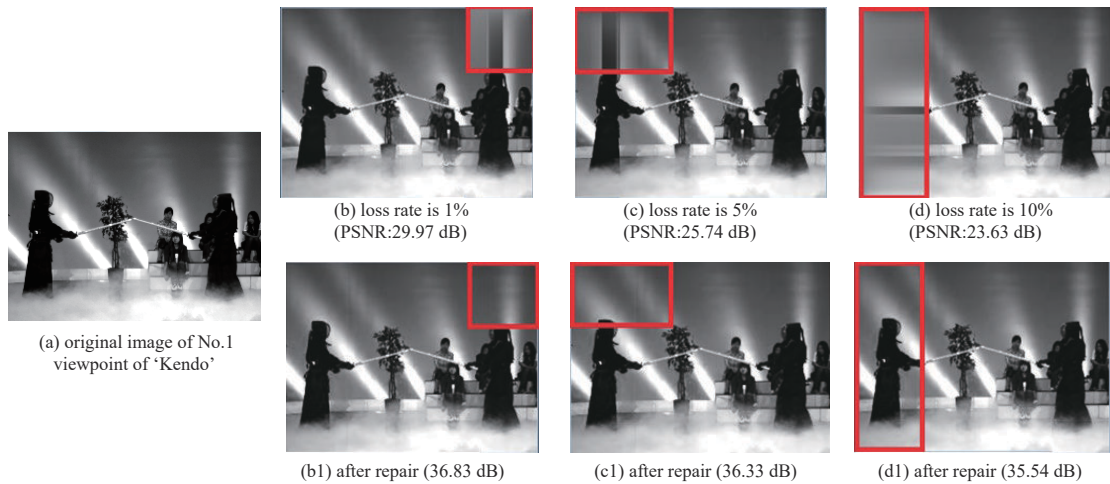


Fig.6 Subjective comparison chart with or without repair under different loss rates
图 6 ‘Kendo’ 序列视点 1 第一帧不同丢失率下有无修复的主观对比图

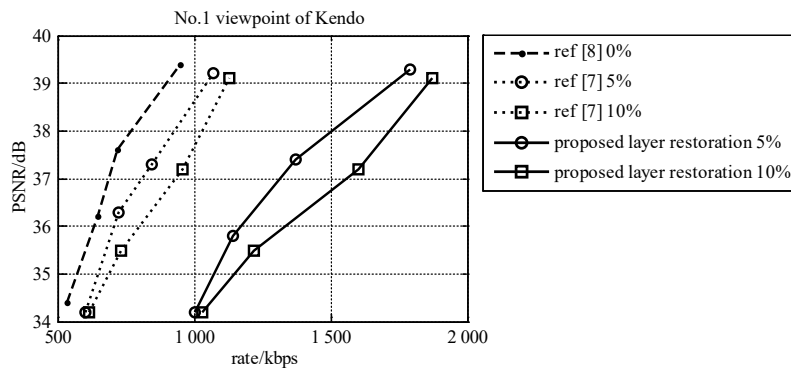


Fig.7 RD curves of WZ frame under lossy side information
图 7 在有损边信息下 WZ 帧的 RD 曲线

根据 DVC 系统的编解码特性可预测：当 K 帧有丢失，则边信息质量恶化，WZ 帧 RD 性能显著下降，图 7 所示的实验结果也验证了该特性。随着丢失率的增大，仅用传统错误掩盖^[7]算法的 K 帧质量严重恶化，导致边信息质量差，同时 WZ 帧的码率增大，且 PSNR 值有一定下降，丢失 10% 时，这一下降尤其明显；相比较，本文层修复方案由于有 WZ 码流的保护，K 帧被修复后边信息质量有所提升，此时 WZ 帧的码率更小，且 PSNR 较传统错误掩盖^[7]方案有明显提升，如‘Kendo’序列在 1 000 kbps 处提升了大约 4 dB。

2.5 系统整体压缩性能测试及分析

图 8 为评价层修复传输方案对 DVC 系统整体 RD 性能的影响测试曲线。

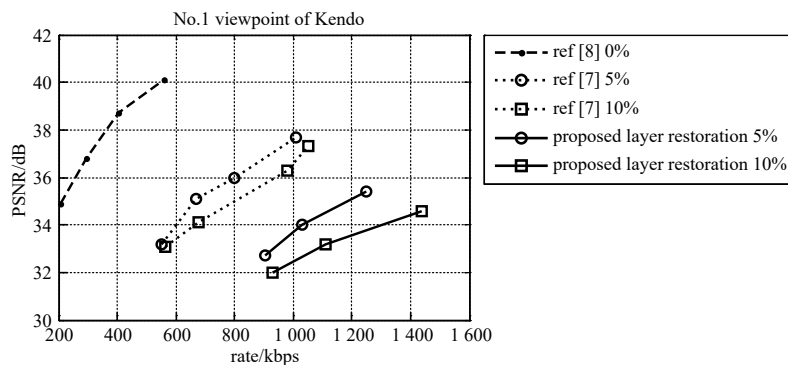


Fig.8 The overall RD performance of the DVC system under the vulnerable channel
图 8 在易丢失信道下 DVC 系统的整体 RD 性能

随着信道丢失率的增加，本文层修复传输方案受丢失的影响比传统错误掩盖^[7]方案要小。在‘Kendo’序列中，当丢失率从 5% 变化到 10% 时，层修复方案的码率仅增加了 50 kbps，但传统错误掩盖方案增加了 300 kbps；换言之，在

信道条件恶化时, 本文方案的RD性能比传统错误掩盖方案提升了2~3 dB。原因在于本文鲁棒传输方案在K帧的传输中虽然加入了修复层码流, 看似增加了码率, 但提升了K帧的解码质量, DVC系统解码端可生成质量更好的边信息, 从而降低了WZ帧的传输码率, 因此从整体DVC系统RD曲线上体现出本文传输方案更具鲁棒性及压缩性。

3 结论

由于在易丢失网络中需要低复杂度和高纠错性的视频传输的特性, 本文设计了一种基于层修复的DVC系统鲁棒传输框架。该传输框架充分利用了DVC编解码结构的固有鲁棒性, 实现了DVC系统的高纠错性鲁棒传输, 并沿袭了DVC系统的低编解码复杂度。同时, 本文还研究了在丢失信道中传输视频K帧修复层码率估计算法和利用已成功解码位平面辅助视频帧解码的重建算法。实验结果表明: 所设计的层修复鲁棒传输框架无论是对DVC系统的K帧还是WZ帧都有解码性能上的提升, 实现了DVC系统鲁棒传输。后续将研究异构网络中DVC系统的分级传输方案。

参考文献:

- [1] 刘开渝. 基于小波域的分布式视频编码研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020. (LIU Kaiyu. Research on distributed video coding based on wavelet domain[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.)
- [2] WEERAKKODY W A R J, FERNANDO W A C, MARTINEZ J L, et al. MAP decoder design for distributed video coding in error prone wireless channels[C]// IEEE International Conference on Industrial and Information Systems. Peradeniya, Sri Lanka: IEEE, 2007:379-382.
- [3] 华玲, 唐韬, 卿粼波, 等. 基于朴素贝叶斯分类的DVC-HEVC快速转码[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(2):235-240. (HUA Ling, TANG Tao, QING Linbo, et al. Fast transcoding of DVC-HEVC based on Naive Bayes classification[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(2):235-240.)
- [4] ZHANG Y, XIONG H, HE Z, et al. Reconstruction for Distributed Video Coding: a context-adaptive Markov Random field approach[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2011, 21(8):1100-1114.
- [5] 杨瀚成. 基于无线传输的DVC优化解码算法研究[D]. 南宁:广西大学, 2019. (YANG Hancheng. Research on DVC optimized decoding algorithm based on wireless transmission[D]. Nanning, Guangxi, China: Guangxi University, 2019.)
- [6] 李军. 基于分布式视频编码的无线传输失真估计研究[D]. 南宁:广西大学, 2017. (LI Jun. Research on distortion estimation of wireless transmission based on distributed video coding[D]. Nanning, Guangxi, China: Guangxi University, 2017.)
- [7] YUAN Zhongcheng, HAN Chuazhao, WANG Yan, et al. Error concealment in pixel based Wyner-Ziv video coding[J]. High Technology Letters, 2019, 25(3):340-346.
- [8] 汪芸, 卿粼波, 王正勇, 等. 分布式视频编码中的边信息优化算法[J]. 电视技术, 2015, 39(9):10-13, 18. (WANG Yun, QING Linbo, WANG Zhengyong, et al. Optimization algorithm for side information in distributed video coding[J]. Video Engineering, 2015, 39(9):10-13, 18.)
- [9] 喻杨灿. 基于小波变换的分布式视频编码技术研究[D]. 成都:四川大学, 2014. (YU Yangcan. Research on distributed video coding technology based on wavelet transform[D]. Chengdu, China: Sichuan University, 2014.)
- [10] PARK J, JEON B. Rate-constrained region of interest coding using adaptive quantization in transform domain Wyner-Ziv video coding[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2016, 62(3):685-699.
- [11] XU W, ZOU J, XIONG H. Joint source-channel rate control for multiview video streaming over erasure channels[C]// IEEE International Conference on Image Processing. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2016:2117-2121.
- [12] LIU W, DONG L, ZENG W. Motion refinement based progressive side-information estimation for Wyner-Ziv video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(12):1863-1875.

作者简介:

杨 红(1983-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为图像处理、视频压缩、视频传输、通信技术研究等.
email:231678612@qq.com.

卿粼波(1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为多媒体通信与信息系统、人工智能与计算机视觉、嵌入式系统等.

何小海(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为图像处理与网络通信、人工智能与大数据分析、图像通信等.

王 林(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向为图像视频编解码等.

丁灏云(1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为图像视频编解码等.