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：

$$E_{X\hat{X}}\left(D\left(X,Dec\left(Z,Dec\left(Y',Z'\right)\right)\right)\right)\leqslant E_{X\hat{X}}\left(D\left(X,Dec\left(Z,Y'\right)\right)\right) \tag{1}$$

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：

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

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：

$$\sigma^2=E\left[\left(x-y\right)^2\right]-E\left[\left(x-y\right)\right]^2 \tag{3}$$

$$\beta=\sqrt{\frac{2}{\sigma^2}} \tag{4}$$

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：

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

$$R^j_{est-h}=\left(1+\alpha+\beta\right)R^j_{\min}+\left(j+M\times t+lev+band\right)\times k \tag{6}$$

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会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。

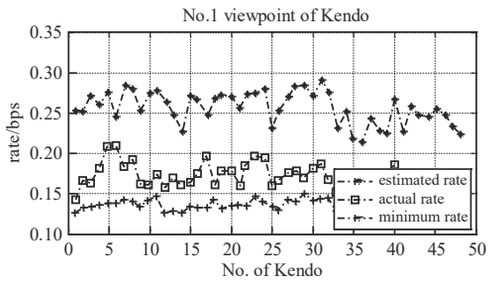

Fig.3 Code rate of ‘Kendo’ sequence when the loss rate is 0%

图3 K帧无丢失时‘Kendo’序列的码率估计值

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码流纠错保护的视频帧重建质量。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视频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。

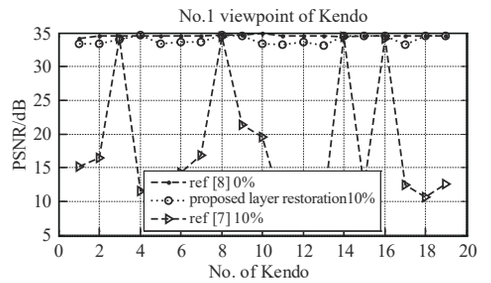

Fig.4 Reconstruction quality of‘Kendo’sequence when the loss rate is 10%

图4 丢失率为10%时，‘Kendo’序列的视频帧质量

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。

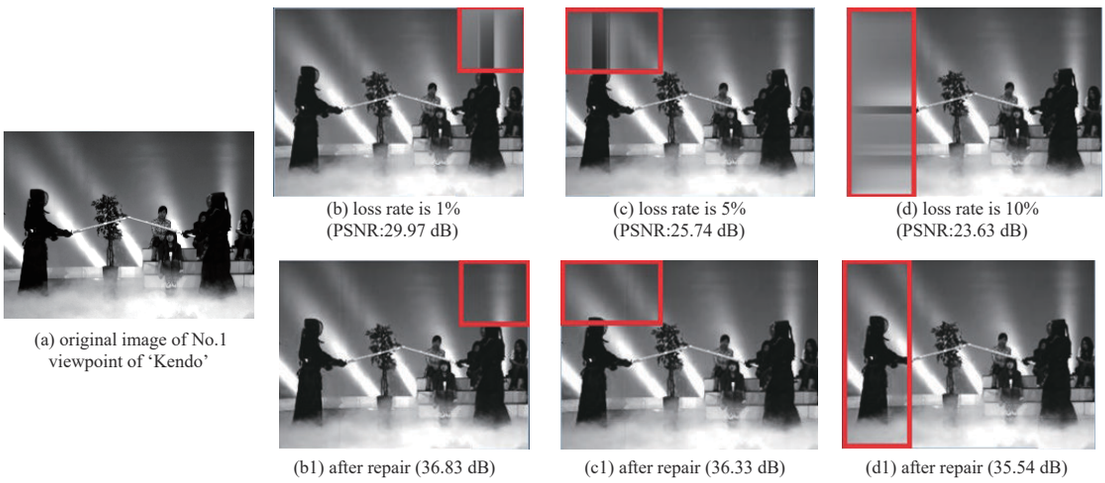

Fig.6 Subjective comparison chart with or without repair under different loss rates
图 6 'Kendo' 序列视点 1 第一帧不同丢失率下有无修复的主观对比图

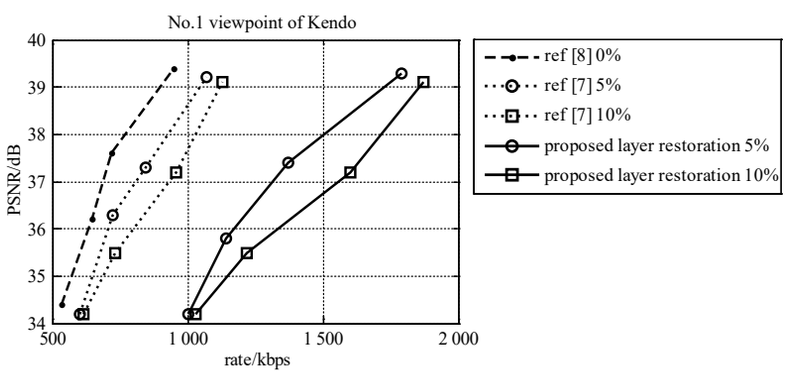

Fig.7 RD curves of WZ frame under lossy side information
图 7 在有损边信息下 WZ 帧的 RD 曲线

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。

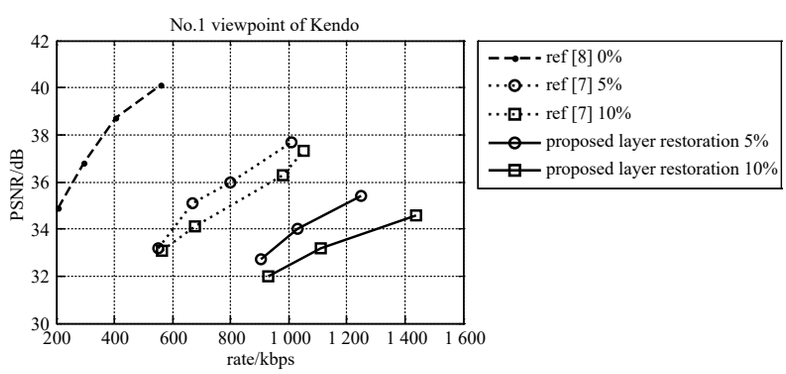

Fig.8 The overall RD performance of the DVC system under the vulnerable channel
图 8 在易丢失信道下 DVC 系统的整体 RD 性能

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