

中图法分类号: TN919.81 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)11-1589-07

检索信息: 杨春玲,林玉广,张兴绍. 半反馈和单向分布式视频编码算法研究[J]. 中国图象图形学报,2010,15(11):1589-1595

半反馈和单向分布式视频编码算法研究

杨春玲¹⁾,林玉广^{1,2)},张兴绍¹⁾

¹⁾(华南理工大学电子与信息学院,广州 510640) ²⁾(华为技术有限公司,深圳 518129)

摘要: 由于基于理想反馈重传策略的分布式视频编码方案非实际可行的系统;另外,由于边信息和分布式帧之间的近似度对分布式视频压缩效率影响较大,但相关研究较少,为此,为了研究切实可行的分布式视频编码系统,通过统计分析边信息与分布式帧的相似度,提出了一种基于 PSNR 的半反馈分布式视频编码方案。为满足无反馈信道的应用场合,进一步提出了基于 PSNR 的单向分布式视频编码方案。实验结果表明,该方案在编码复杂度增加不大的条件下,不仅切实可行,同时有效地降低了译码复杂度,且能灵活控制传输码率,但视频解码质量稍逊于理想的反馈重传分布式视频编码。

关键词: 分布式视频编码; Turbo 码; 半反馈; 单向传输; 边信息

Research on semi-feedback and unidirectional distributed video coding

YANG Chunling¹⁾, LIN Yuguang^{1,2)}, ZHANG Xingshao¹⁾

¹⁾(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

²⁾(Huawei Technologies Co. Ltd., Shenzhen 518129)

Abstract: Distributed video coding (DVC) based on ideal ARQ is unrealistic. And little attention has been paid to the correlation between side information and distributed frames which has large influence on the compression performance. In this paper, through statistical analysis of the similarity between side information and distributed frames, a PSNR-based semi-feedback DVC is proposed. In order to fulfill the applications without using feedback channels, a PSNR-based unidirectional DVC is proposed too. Simulation results demonstrate that, the performances of semi-feedback and unidirectional DVC based on PSNR can significantly reduce decoding complexity, and are practical as well as flexible to control rates, while almost maintaining the same encoding complexity. But the decoded video quality is a little inferior to the ideal ARQ DVC.

Keywords: distributed video coding; Turbo codes; semi-feedback; unidirectional transmission; side information

0 引言

传统的视频压缩编码,如 MPEG-x 和 H. 26x 标准,是在编码端利用视频序列的相关性,通过运动估计和运动补偿等技术达到压缩目的,其编码端计算复杂度是解码复杂度的 5~10 倍,适合于视频编码一次、解码多次的应用场合。对于计算能力、内存容

量和耗电量均受限的无线视频采集终端,传统视频编码技术已不再适用。最近发展起来的分布式视频编码(DVC)具有编码简单、高效压缩等特点,为以上应用场合提供了很好的解决方案,受到了广泛关注。

早在 1973 年, Slepian 和 Wolf 就提出了分布式无损编码理论^[1], 1976 年, Wyner 和 Ziv 在此基础上提出了分布式有损编码理论^[2]。分布式编码理论指出,利用分布式编解码方法(独立编码,联合解

基金项目:国家自然科学基金项目(60972135);广东省自然科学基金项目(06025642);中央高校基本科研业务费专项基金项目(2009ZM0231)。

收稿日期:2009-06-26;改回日期:2009-07-20

第一作者简介:杨春玲(1970—),女,教授。1999 年获南京理工大学电子工程系通信与信息工程专业博士学位。主要研究方向为图像/视频压缩、图像质量评价。E-mail:eeclyang@scut.edu.cn。

码)对两个统计相关信号进行压缩编码可获得与传统编码(对信号进行联合编解码)相同的效率。虽然分布式编码算法的信息理论早在 30 多年前就已提出,但是直到最近几年才开始出现分布式编码实现算法。主要的分布式编解码算法包括 Girod 等人提出的 Wyner-Ziv 视频编码^[3], Ramchandran 等人提出的 PRISM 视频编码^[4], Xiong Zixiang 等人提出的分级 Wyner-Ziv 视频编码^[5]。国内学者对分布式视频编码也做了较深入的研究,相继取得了一些成果,干宗良等人提出了一种空间域 Wyner-Ziv 视频编码系统的性能改进算法^[6],和一种改进的边信息估计算法^[7]卿粼波等人提出了 3 种边信息优化策略^[8]。

以上所述编码方案都是基于反馈重传策略的,虽然能实现最佳码率控制,但对于不存在反馈信道的应用场合则不切实际。为此,Weerakkody 等人提出了单向无反馈的分布式视频编码方案^[9],在此基础上,文献[10]提出了对错误的比特位置进行标记,并进行校正的改进算法。Morbee 等人提出了像素域无反馈分布式视频码率分配算法^[11],并给出了估计各码平面译码所需码率的经验公式,但却增加了编码端的复杂度。

本文通过统计多种测试序列的峰值信噪比(PSNR)值在不同区间的误码率,结合误码率与成功译码的 Slepian-Wolf 码率极限的关系,提出了一种计算复杂度较低的基于 PSNR 的半反馈和单向分布式视频编码方案。

1 基于 PSNR 的半反馈分布式视频编码

在分布式视频解码过程中存在两个主要问题:一是无法准确知道成功译码所需码率;二是无法准

确得知每次迭代译码后的误码率。此外,边信息和分布式帧的近似度也直接影响着分布式帧的重建质量。当边信息较好时,纠错译码对解码图像质量改善不大,可以用较少的量化级数对视频帧进行编解码,甚至可以直接利用边信息重建图像,即在保证解码质量条件下可节省码率。当边信息较差时,由于初始误码率较高,重要码平面的初始误码率已比较大,有些码平面无法成功译码,因此可以考虑只对少部分重要码平面进行纠错译码。

基于以上 3 个问题及分析,本文提出了一种基于 PSNR 的半反馈分布式视频编码方案,该方案系统结构如图 1 所示,具体实现步骤如下:

1) 将视频序列帧分为关键帧 K 和分布式 Wyner-Ziv 帧 X_i 两类;

2) 对于关键帧 K ,采用 H. 264 等传统帧内编解码方法进行编解码;

3) 对 Wyner-Ziv 帧 X_i 进行编码

(1) 利用 Wyner-Ziv 帧 X_i 相对于前后两关键帧平均的 PSNR 值,估计 X_i 相对于边信息的 PSNR 值;

(2) 根据 PSNR 值所属区间,选择 Wyner-Ziv 帧的量化级数 M ,经码平面分离及格雷码编码后,再采用 Turbo 码编码,即得到相应的码平面校验位码流;

(3) 根据 PSNR 值所属区间,先估计得到每个码平面的初始传输码率,然后通过删余来传输相应的校验位,同时传输该视频帧 PSNR 值所在区间的标志码字(本实验用 3bits 表示各标志码字);

4) Wyner-Ziv 帧 X_i 的解码方法

在解码端,根据接收到的 PSNR 值的区间标志码字,先得到 Turbo 码译码的初始传输码率;然后将接收到的校验位码流和边信息一起,经 Turbo 译码器迭代译码。最后通过误码率估计得到每次迭代译

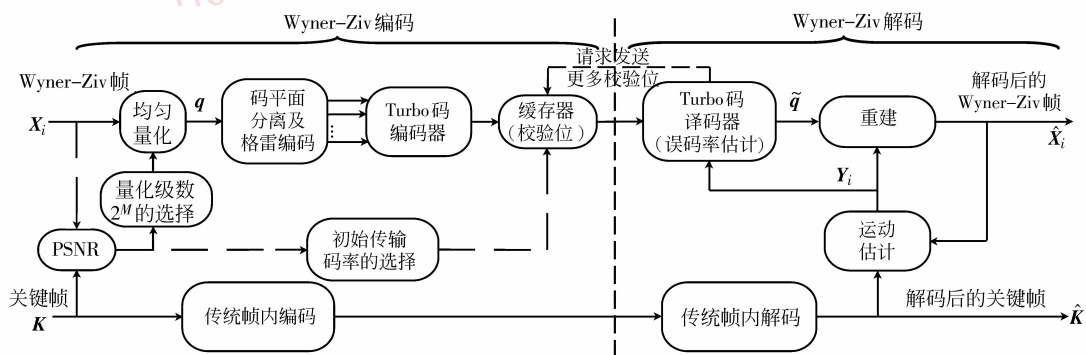


图 1 基于 PSNR 的半反馈 Wyner-Ziv 视频编码结构图

Fig. 1 Architecture of PSNR-based semi-feedback Wyner-Ziv video coding

码后的误码率(估计算法 1.2 节给出),并和设定的误码阈值进行比较,以判断是继续迭代译码,还是请求发送更多校验位重新译码,直至译码成功为止;

5) 将解码后的信息位和边信息一起,用来重构得到重建的 Wyner-Ziv 帧。

1.1 误码率与 Slepian-Wolf 理论限

根据信息理论,分布式视频编码中的成功纠错译码所需的最低码率就是 Slepian-Wolf 理论限,其计算式如下:

$$H(X|Y) = -p \log(p) - (1-p) \log(1-p) \quad (1)$$

式中 p 为误码率, p 越大,成功译码所需的码率就越高。

1.2 解码端误码率估计与判决

本文方案是通过式(2)来估计得到 Turbo 码每次迭代译码后的误码率 $P_E^{[12]}$ 。

$$P_E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{1 + e^{L(\hat{u}_k)}} \quad (2)$$

式中, N 为每个译码比特平面的帧长,在像素域, $N = 176 \times 144 = 25\,344$; $L(\hat{u}_k)$ 为迭代译码时比特 u_k 的对数似然比。如果译码后的误码率 P_E 大于设定的误码阈值,且未达到最大译码迭代次数,则继续进行迭代译码;否则通过反馈信道增大码率来重新译码,直至译码成功。

1.3 量化级数及初始传输码率的选择

如前所述,由于边信息与分布式帧的近似度直接影响着分布式帧的解码质量,为此可以根据 PSNR 值的不同区间,通过选择不同的量化级数来得到不同的解码质量。对于 PSNR 值属于 $(0, 24]$ 和 PSNR 值属于 $[42, 44)$ 的分布式帧,本文方案只对前两个重要比特平面进行编解码;对于 PSNR 值大于等于 44dB 的分布式帧,可直接采用边信息作为重建帧;而对于 PSNR 值落在其他区域的分布式帧,则采用 4 个比特平面进行编解码。

一般地,分布式帧相对于边信息的 PSNR 值越大,相应的码平面之间的初始误码率就越低,且纠错译码所需的校验位越少;另外,由于不同码平面之间有以下不同的相关性:高码平面的相关性较大,相应的初始误码率较低;低码平面的相关性较小,相应的初始误码率就较高,因此,不但 PSNR 值在不同区间时,成功译码所需的码率不同,而且 PSNR 值在同一区间时,不同比特平面成功译码所需的码率也是不同的。图 2 给出了运动较快的 Carphone 序列以及运动较慢的 Salesman 序列的分布式帧与采用简单平均内插法得到的边信息之间的 PSNR 值与其相应的高四位码平面初始误码率的关系图。图 2 中的 MSBP 代表最高位码平面,2SBP 代表次高位码平面。

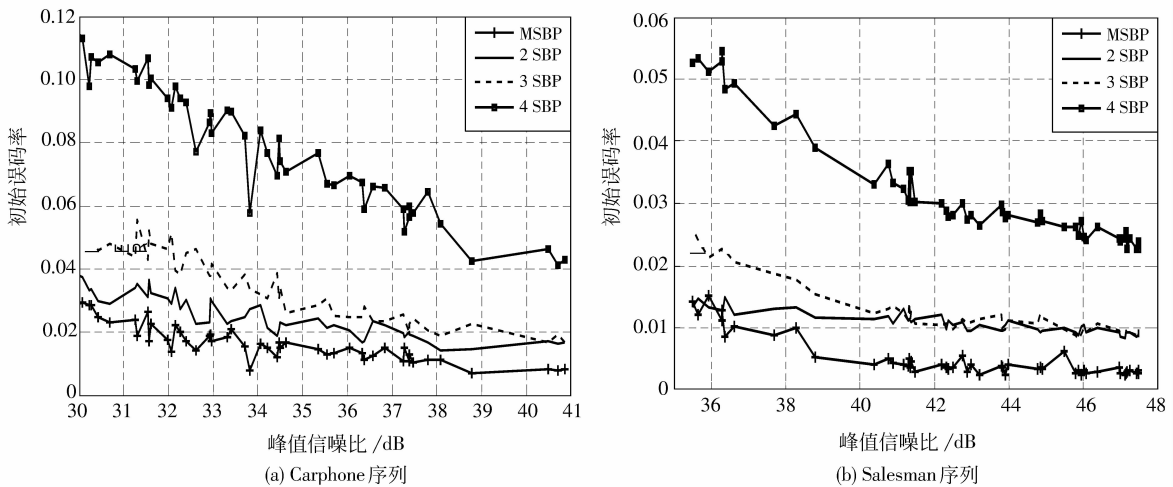


图 2 不同 PSNR 值区间比特平面初始误码率

Fig. 2 Initial BER of each bit-plane vs PSNR

由图 2 可见,对于某一固定的码平面,若 PSNR 值在同一区间时,则不同测试序列的初始误码率相差不大,可采用相同的初始传输码率。通过理论分析和实验相结合的方法即可得到 PSNR 值不同区间

的初始码率 $R = \frac{N_1}{N_2}$, N_1 为一个删余周期内需要传输的校验位数目, N_2 为删余周期。具体实现步骤如下:

1) 根据不同序列的 PSNR-初始误码率统计图

(见图 2),按照一定的间隔先把 PSNR 值划分为不同的区间,然后统计出每个区间相应码平面的初始误码率的集中区间 $[p_1, p_2]$ 。

2) 利用式(1)计算出误码率所对应的 Slepian-Wolf 码率限区间 $[H_1, H_2]$ 。

3) 选择合适的删余周期。如果删余周期太大,码率变化的步长小,则译码不成功需要反馈重传的次数就较多;而如果删余周期偏小,则码率变化的最小步长就大,虽然译码不成功时需要反馈重传的次数较少,但码率损失却较大。

4) 将 Slepian-Wolf 码率限 $H_i(i=1$ 或 $2)$ 乘以删余周期,并向上取整即得到成功纠错译码需传输的最少比特数 $B_{\min}^i(i=1$ 或 $2)$ 。

5) 由于实际系统中成功译码所需的码率要稍高于理论限,因而本文取初始传输比特数为 $(B_{\min}^1 + B_{\min}^2) / 2 + 2$,并通过合理的进行删余矩阵对校验位序列进行删余传输。在解码端,对接收到的校验位进行纠错译码,若译码成功,则输出此时对应的传输码率;若译码不成功,则增大码率,传送新的校验位进行重新迭代译码,直至译码成功为止。

6) 根据成功译码所需要传输校验位数目即可得到对大部分码平面能够一次性成功译码的传输码率,将其作为该区间的初始码率。

经过实验得到的各 PSNR 区间的初始码率 R 设置如表 1 所示。将边信息与分布式帧之间的 PSNR 值分为 7 个区间,并给出了 PSNR 值在 $[24, 44)$ 之间

的具体参数。对于 PSNR 值大于等于 44 dB 的视频帧,边信息质量已较好,可不再进行编码,而是直接利用边信息作为解码帧,这样在保证图像质量的同时也节省了码率;同理,对于 PSNR 值在 $[42, 44)$ 之间的视频帧,只对前两个码平面进行编解码;而对于 PSNR 值小于 24 dB 的视频帧,则由于重要码平面的初始误码率已比较大,有些达到了无法成功解码,甚至越纠越错的地步,因此只对前两个重要比特平面进行纠错译码。

表 1 基于 PSNR 的半反馈分布式视频编码的初始传输码率
Tab.1 Initial transmission rate of PSNR-based semi-feedback DVC

码平面	不同峰值信噪比区间的初始传输码率 R						
	0 (0,24)	1 [24,28)	2 [28,32)	3 [32,36)	4 [36,42)	5 [42,44)	6 [44, +∞)
MSBP	-	12/32	10/32	8/32	6/32	4/32	
2 SBP	-	13/32	10/32	9/32	6/32	4/32	
3 SBP		18/32	15/32	10/32	6/32		
4 SBP		32/32	21/32	16/32	11/32		

2 基于 PSNR 的单向分布式视频编码

理想的基于反馈重传策略的分布式视频编码以及上节所提出的基于 PSNR 的半反馈分布式视频编码都是基于反馈重传策略的,但这种动态反馈机制限制了分布式视频编码在无反馈信道场合的实际应用。针对这种情况,本节提出了一种基于 PSNR 的单向分布式视频编码方案。像素域基于 PSNR 的单向 Wyner-Ziv 视频编码结构如图 3 所示。

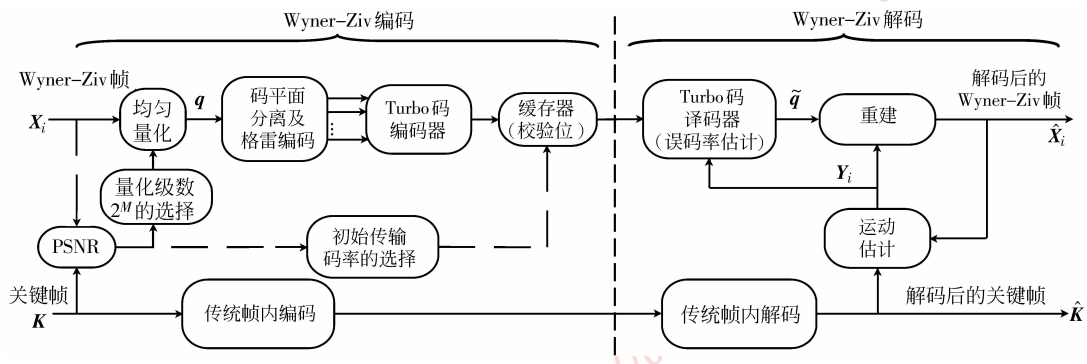


图 3 像素域中基于 PSNR 的单向 Wyner-Ziv 视频编码结构图

Fig.3 Architecture of PSNR-based unidirectional Wyner-Ziv video coding in pixel-domain

由于单向分布式视频编码不存在反馈信道,因此解码端如果译码不成功,则无法要求更多校验位。为了保证译码取得好效果,一种办法是选择对所有视频帧都能够一次性成功译码的传输码率,但这会

增加编码码率;如果初始传输码率较小,那么虽然降低了码率,但由于大部分帧不能成功解码,因此会极大地影响视频帧的重建效果。本节提出的基于 PSNR 的单向分布式视频编码,是通过选择绝大多

数比特平面能够一次性成功译码的传输码率,而对少部分无法成功解码的码平面,则使用单独后处理的方法来取得较好的编码效率。

像素域基于 PSNR 的单向分布式视频编码方案与基于 PSNR 的半反馈分布式视频编码类似,主要区别如下:

1) 单向分布式视频编码不存在反馈信道。

2) 单向分布式视频编码中,无法请求重传,传输码率要稍高于半反馈分布式视频编码的初始传输码率。表 2 给出了对绝大多数比特平面能够一次性成功译码的传输码率。

表 2 基于 PSNR 的单向分布式视频编码传输码率

Tab. 2 Transmission rate of PSNR-based unidirectional DVC

码平面	不同峰值信噪比区间的传输码率 R						
	0 [0, 24)	1 [24, 28)	2 [28, 32)	3 [32, 36)	4 [36, 42)	5 [42, 44)	6 [44, +∞)
MSBP	-	16/32	12/32	10/32	7/32	5/32	
2 SBP	-	16/32	12/32	11/32	8/32	7/32	
3 SBP		26/32	18/32	13/32	8/32		
4 SBP		38/32	26/32	21/32	15/32		

3) 不能成功解码的码平面解决方案如下:

(1) 如果第 1 个码平面译码不成功,则不对后

续码平面进行译码,而是直接利用边信息重建该帧视频。

(2) 如果第 $n(n \geq 2)$ 个码平面译码不成功,则不再对其后续码平面进行译码,而是直接利用前 $(n - 1)$ 个解码后的比特平面和边信息进行重建。

3 实验结果及分析

对本文所提出的基于 PSNR 的半反馈和单向分布式视频编码方案分别进行了仿真实验,对 Foreman, Carphone, Mother&Daughter, Salesman 等测试序列的前 101 帧实验结果如表 3 及图 4 所示,并与理想反馈重传策略的分布式视频编码进行了比较。表 3 给出了每个分布式帧的平均译码时间大,图4 给出了编码性能比较。实验中,所采用的 Turbo 码编码器的码率为 1/2,生成矩阵为 $\left[1, \frac{1 + D + D^3 + D^4}{1 + D^3 + D^4} \right]$,奇数帧为关键帧,偶数帧为分布式帧,关键帧采用质量参数 $QP = 12$ 的 H. 264 帧内编解码方式编码, IDVC, HDVC 和 UDVC 分别代表理想反馈重传策略、基于 PSNR 的半反馈和单向分布式视频编码方案, Δt 为 HDVC, UDVC 相对于 IDVC 译码时间的减少比例(%)。

表 3 HDVC, UDVC 与 IDVC 不同量化级数下分布式帧的平均译码时间比较

Tab. 3 Comparison of decoding time for distributed frames among HDVC, UDVC and IDVC at each quantization level

测试序列	比特平面数	IDVC	HDVC		UDVC	
		t/s	t/s	$t/\%$	t/s	$\Delta t/\%$
Foreman	$M = 1$	242.36	170.93	-29.47	65.03	-73.17
	$M = 2$	432.29	308.63	-28.61	125.99	-70.86
	$M = 3$	700.82	464.91	-33.66	175.89	-74.90
	$M = 4$	932.33	627.45	-32.70	211.14	-77.35
Carphone	$M = 1$	185.09	118.27	-36.10	52.85	-71.45
	$M = 2$	420.03	348.44	-17.04	142.36	-66.11
	$M = 3$	692.59	511.69	-26.12	192.97	-72.14
	$M = 4$	905.70	646.59	-28.61	230.89	-74.51
Mother & Daughter	$M = 1$	205.55	133.28	-35.16	49.23	-76.05
	$M = 2$	394.57	250.62	-36.48	99.38	-74.81
	$M = 3$	637.59	464.76	-27.11	166.85	-73.83
	$M = 4$	885.92	574.50	-35.15	188.04	-78.77
Salesman	$M = 1$	179.87	70.22	-60.96	31.43	-82.53
	$M = 2$	399.92	204.67	-48.82	70.69	-82.32
	$M = 3$	623.28	281.92	-54.77	96.69	-84.49
	$M = 4$	929.52	341.02	-63.31	110.78	-88.08

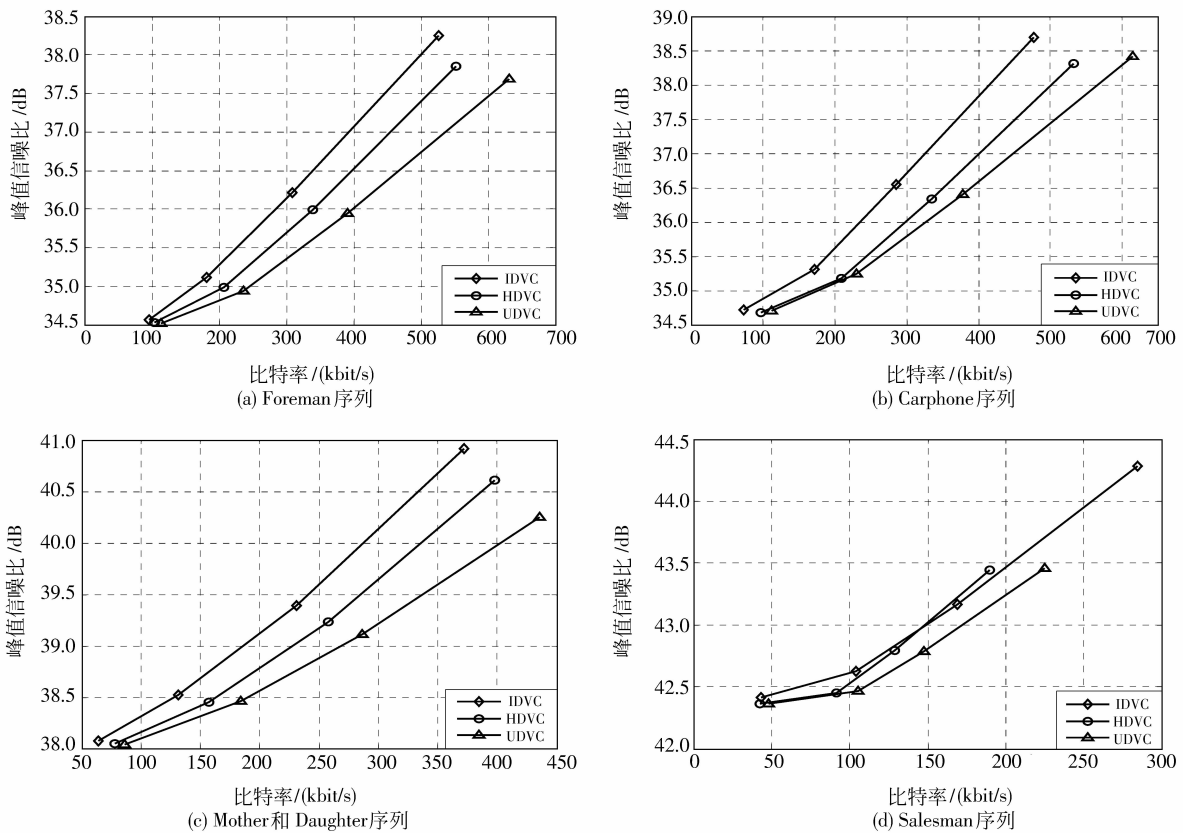


图 4 不同测试序列采用不同分布式视频编码方案的编码性能比较

Fig. 4 Performance of different test sequences using different DVC schemes

基于 Turbo 码的分布式视频编码的主要复杂度在于 Turbo 码的迭代译码过程^[13], 本文仿真实验过程也证实了这一点。从表 3 可以看出, HDVC 和 UDVC 每个分布式帧的平均译码时间明显要小于 IDVC, 特别是 UDVC 的译码时间下降非常明显, 可节约 66% 以上的译码时间, 可见, HDVC 和 UDVC 大大地降低了译码复杂度。

从图 4 可以看出, IDVC 的编码性能要优于 HDVC, HDVC 优于 UDVC, 但在比特率差别不大的情况下, 对于运动较慢的序列 (如 Salesman), 编码性能差别也不大。这是因为: 首先, IDVC 通过理想动态的反馈重传策略能够很好地控制传输比特率 (实际应用中是不可实现的), 而 HDVC 的初始传输比特率是按照 PSNR 值区间进行划分的, 同一个区间采用相同的初始传输码率可能会使得部分码平面因采用过多校验位进行纠错译码而损失了部分比特率。其次, HDVC 在解码端是通过误码率估计理论来估计迭代译码后的误码率, 不能保证其准确度。

而 UDVC 是在 HDVC 的基础上, 通过稍微增大传输比特率来保证对大多数分布式帧能够成功译码, 即通过牺牲部分比特率来满足无反馈信道应用场合的要求。

另外, 由图 4 还可看出, 对于运动较慢的 Salesman 序列, HDVC 的编码性能跟 IDVC 基本相当, 并且 HDVC 的比特率要稍低于 IDVC。这是因为在 HDVC 方案中, 对于 PSNR 值较大的视频帧, 只需对部分码平面传输校验位进行纠错译码, 甚至有些码平面无需编码传输, 因而节省了比特率。此外, 由于 HDVC, UDVC 不像 IDVC 在解码端需要知道分布式帧的原始信息, 因此更加合理、切实可行。

4 结论

本文研究了不同传输机制的分布式视频编码算法, 并基于 PSNR, 提出了一种半反馈分布式视频编码方案, 解决了传统分布式视频编码中初始误码率

和解码过程中误码率的计算问题。该方案还考虑到边信息精度对分布式视频帧的影响,针对不同的 PSNR 值区间选择不同的量化级数,比传统的分布式视频编码对所有视频帧采用统一的编解码方案更为合理。为了满足无反馈信道的应用,进一步提出了基于 PSNR 的单向分布式视频编码方案。实验结果表明,基于 PSNR 的半反馈和单向分布式视频编码,在编码端复杂度增加不大的条件下,不仅估计得到了初始传输码率和每次迭代译码后的误码率,而且能根据不同的 PSNR 区间选择不同的解码质量,解码性能虽然稍逊于理想的反馈重传分布式视频编码,但仍是一种切实可行的编解码方案,其不仅能灵活控制传输码率,且大大降低了解码端的计算复杂度,可满足实际应用要求。

参考文献 (References)

- [1] Slepian J D, Wolf J K. Noiseless coding of correlated information sources [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19(4): 471-480.
- [2] Wyner A, Ziv J. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(1): 1-10.
- [3] Girod B, Aaron A, Rane S, et al. Distributed video coding [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(1): 71-88.
- [4] Puri R, Ramchandran K. PRISM: A video coding paradigm with motion estimation at the decoder [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(10): 2436-2448.
- [5] Xu Qian, Xiong Zixiang. Layered Wyner-Ziv video coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(12): 3791-3803.
- [6] Gan Zongliang, Qi Lina, Zhu Xiuchang. A novel performance improved method for pixel-domain Wyner-Ziv Video coding system [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 2014-2018. [于宗良,齐丽娜,朱秀昌.一种空间域 Wyner-Ziv 视频编码系统的性能改进算法 [J]. 电子学报, 2007, 35(10): 2014-2018.]
- [7] Gan Zongliang, Zhu Xiuchang. Improved side information estimation algorithm for Wyner-Ziv video coding [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(19): 53-56. [于宗良,朱秀昌. Wyner-Ziv 视频编码中边信息估计改进算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 53-66.]
- [8] Qing Linbo, He Xiaohai, Lu Rui, et al. The optimization of side information with several strategies for distributed video coding [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(1): 138-143. [卿琳波,何小海,吕瑞,等.分布式视频编码中边信息的多策略优化 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(1): 138-143.]
- [9] Weerakkody W A R J, Fernando W A C, Adikari A B B. Distributed video coding of pixel interleaved Wyner-Ziv frames [C] // Proceedings of First International Conference on Industrial and Information Systems. Los Angeles, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 525-528.
- [10] Weerakkody W A R J, Fernando W A C, Adikari A B B. Unidirectional distributed video coding for low cost video encoding [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(2): 788-795.
- [11] Morbee M, Prades-Nebot J, Pizurica A, et al. Rate allocation algorithm for pixel-domain distributed video coding without feedback channel [C] // Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. College Station, Texas, USA: Texas A&M University, 2007: 521-524.
- [12] Land I, Hoeher P A, Songer U. Log-likelihood values and monte carlo simulation-some fundamental results [C] // Proceedings of Second International Symposium on Turbo Codes & Related Topics, Brest, France, 2000: 43-46.
- [13] Fang Sheng, Liang Yongquan, Li Shenyuan. What affects decoding complexity of distributed video codec based on turbo code [C] // Proceedings of Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing. Los Angeles CA, USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 171-176.