

分布式视频编码方法研究

蒋刚毅^{1),2)} 金智鹏¹⁾ 郁梅^{1),2)}

¹⁾(宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211) ²⁾(北京大学视听信息处理国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 分布式视频编码(Distributed Video Coding, DVC)是一种新颖的视频压缩方法,具有极低的编码复杂度和良好的抗噪声鲁棒性。为了使人们对该编码方法有所了解,该文首先详细介绍了分布式视频编码的理论基础和特点,然后讨论了分布式视频编码的两大关键技术,包括编码端高效压缩和解码端边信息(side information)插值;最后总结了分布式视频编码在低复杂度编码和视频信号鲁棒传输等两大应用领域的研究现状,并对其研究前景进行了探讨。

关键词 分布式视频编码 边信息 低复杂度编码 鲁棒传输

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)03-0386-08

Research on Distributed Video Coding

JIANG Gang-yi^{1),2)}, JIN Zhi-peng¹⁾, YU Mei^{1),2)}

¹⁾(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211)

²⁾(National Key Laboratory of Machine Perception, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Distributed video coding is a new paradigm for video compression, with low encoding complexity and robustness to channel losses. In this paper, principle and characteristics of distributed video coding is firstly introduced, followed by two key techniques including highly effective compression and interpolation of side information. Then, recent development of the research on two main application areas of distributed video coding is reviewed, along with the future trends of distributed video coding.

Keywords distributed video coding(DVC), side information, low-complexity encoding, robust transmission

1 引言

随着视频技术的发展,许多视频系统要求客户终端必须具有双向功能,即要求客户终端不仅可以实现传统编码标准的低复杂度解码,还要求终端设备具有视频信号实时编码、传输等功能。比如移动可视电话、无线视频监视系统、无线PC摄像机、多媒体网络传感器以及无线多视点视频编码等。值得注意的是,此类系统的视频编码有其明显不同于普通视频压缩与通信的特点:

(1) 受制于设备成本等因素,客户终端的计算

能力和存储容量等资源都十分有限,难以执行复杂的帧间预测编码过程;

(2) 从客户端的无线化、便携式及电池容量等角度考虑,要求终端设备的视频压缩算法必须是低复杂度、低功耗的。

现有的 MPEG、H. 26X^[1] 视频编码标准在编码端都采用了运动补偿预测技术,充分利用视频序列帧间相关性进行预测编码,以获取高的率失真性能。由于使用了高度复杂的运动估计与补偿等帧间预测技术,其编码器复杂度通常是解码器的5~10倍^[2]。因而,其编码器与解码器相比,要求具有更高的计算能力、存储容量等。基于帧间预测编码的视频编码

基金项目:国家自然科学基金项目(60472100,60672073);浙江省自然科学基金项目(RC01057,Y105577);教育部科学技术研究重点项目(206059);浙江省科技攻关项目(2004C31105);宁波市自然科学基金项目(2007A610037)

收稿日期:2006-04-18; **改回日期:**2006-11-08

第一作者简介:蒋刚毅(1964~),男,教授,博士生导师。主要研究领域为图像处理与视频信号编码、多媒体信息传输与信息安全、基于视觉的智能控制。E-mail: jianggangyi@nbu.edu.cn

标准主要适用于服务器端的视频信号处理,即视频内容经一次高效编码压缩后传输给广大低端用户下载和解码播放,如广播系统、视频点播系统等“一对多”类型的应用场合。

分布式视频编码(distributed video coding, DVC)突破了传统视频编码的束缚,采用“帧内编码+帧间解码”技术,通过在解码端发掘视频信号的相关性进行“帧间预测解码”,从而去掉了编码端复杂的帧间预测,具有低复杂度编码的特性,能较好地满足客户终端视频编码与通信的需求,是当前国内外的研究热点^[3]。分布式视频编码本身又以信道编码技术为基础,对信道噪声污染有先天的鲁棒性,为实现视频信号的鲁棒传输提供了新思路。

2 分布式视频编码原理与系统

分布式信源编码利用帧内编码技术相互独立地编码两个或多个相关信源,并将其码流发送到接收端联合解码,在解码端通过发掘各信源间相关性,进行联合预测解码。若互相独立地编码两路信号 X 和 Y ,设它们的熵分别为 $H(X)$ 和 $H(Y)$,相应的码率为 R_X 和 R_Y ,两路信号的联合熵为 $H(X, Y)$,则总码率为

$$R = R_X + R_Y \geq H(X) + H(Y) \geq H(X, Y) \quad (1)$$

Slepian 和 Wolf 分析了分布式信源编码的码率极限,并证明:互相独立地编码两路信号 X 和 Y ,其总码率 $R = R_X + R_Y$ 依然可达到两路信号的联合熵 $H(X, Y)$ ^[4],如下式所示:

$$\begin{aligned} R_X + R_Y &\geq H(X, Y) \\ R_X &\geq H(X | Y) \\ R_Y &\geq H(Y | X) \end{aligned} \quad (2)$$

Wyner 与 Ziv 在此基础上提出了边信息辅助解码的分布式信源编码方案^[5],无论边信息 Y 是仅仅作用在解码端,还是同时作用在编码端与解码端,对 X 序列均方率失真性能的影响是相同的。Slepian-Wolf 理论以及 Wyner-Ziv 理论为分布式视频编码的发展奠定了理论基础,其中无损的分布式信源编码通常被称为“Slepian-Wolf 编码”,在 Slepian-Wolf 编码前加上量化器而构成 Wyner-Ziv 编码器。

近年来,随着多媒体终端设备的视频编码越来越受关注,鲁棒性强且编码复杂度极低的分布式视频编码成为学术界研究热点。DCT 变换域分布式视频编码的系统结构比基于像素域的分布式视频编

解码复杂,但其率失真性能也要比像素域的方法高 $2 \sim 2.5 \text{ dB}$ ^[6]。因此,这里以变换域分布式视频编码为基础来讨论分布式视频编码的系统结构。分布式视频编码由“关键帧(Key 帧)”编码器和“Wyner-Ziv 帧(W 帧)”编码器两部分组成,Key 帧编码器采用传统的帧内编解码技术。W 帧编码时,先进行基于块的 DCT 变换并量化,然后将 DCT 量化系数按位平面分层送至 Slepian-Wolf 编码器进行熵编码。编码器将编码生成的校验码存于编码端缓存器中,根据解码端的反馈请求发送校验码给解码器作迭代纠错解码。解码时,Slepian-Wolf 解码器根据解码边信息和接收到的校验比特从最高位平面开始进行迭代解码,若根据当前已接收到的校验信息仍不能实现正确的解码,则需通过反馈信道请求编码端缓存器继续发送校验码。解码端再重新进行解码,直至将解码误比特率降低至预定要求。在完成 DCT 量化系数解码后将依据下式对解码的 DCT 量化系数进行钳制和重建,并进行反量化和逆 DCT 变换得到解码图像 W' 。

$$x'_m = E(x_m | q'_m, \hat{x}_m) \quad (3)$$

这里, x'_m 为重构的 DCT 变换量化系数, x_m 为编码时 W 帧的 DCT 变换量化系数, q'_m 为 Slepian-Wolf 解码得到的 DCT 变换量化系数, \hat{x}_m 为解码边信息的 DCT 量化系数。采用重建钳制策略^[7,8]可以将解码重建

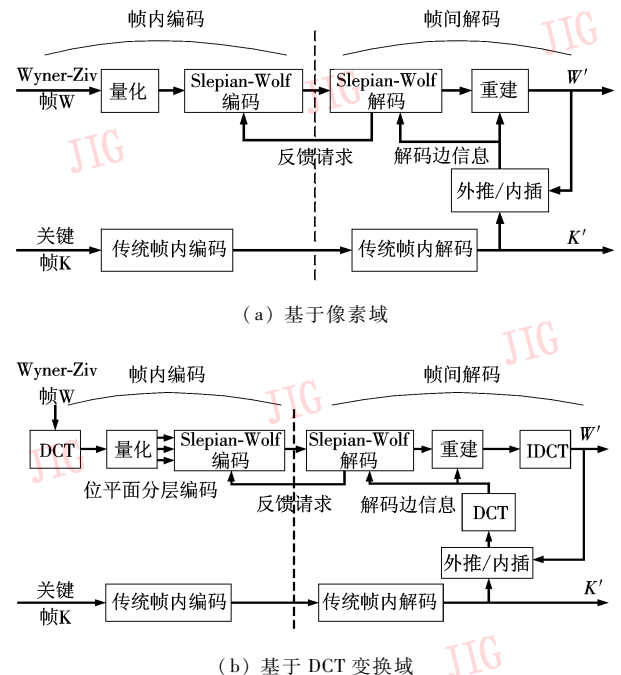


图 1 基于像素域和 DCT 变换域的分布式视频编解码框图
Fig. 1 Pixel and DCT domain based distributed video coding

图像的最大误差限制在一个量化级别之内,有效地去除严重影响视觉质量的大幅噪声点,改善重建图像质量。在过去的研究中,人们为 Slepian-Wolf 编码器选择过多种纠错编码技术,如 turbo 码^[9]、LDPC 码^[10]、网格码^[11]、RS 码^[12]等等。近年来,LDPC 码以其优异的性能、简洁的形式及良好的应用前景备受青睐。

3 关键技术之一:解码边信息重建

在接收端,W 帧的 Slepian-Wolf 纠错解码时需要一个相应的边信息。解码边信息实际上是在解码端对编码的 W 帧进行估计,它要求在 W 帧未知的情况下,利用视频序列的帧间相关性对编码的 W 帧做出准确的估计。而在传统的视频编码标准中,编码帧间预测补偿都是在本帧信息已知的前提下到参考帧中搜索最佳匹配块。解码端边信息的预测精度很大程度上决定着分布式视频编码的率失真性能。边信息对 W 帧的预测越准确,则解码器正确解码所需的校验比特越少,编码率失真性能就越好。因此,如何准确地生成边信息是分布式视频编码的关键所在;生成边信息方法主要分为基于运动补偿的内插插值法(motion compensation based interpolation, MC-I)、基于运动补偿的外推插值法(motion compensation based extrapolation, MC-E)和基于 hash code 运动补偿法等。

3.1 基于运动补偿的内插插值法(MC-I)

图 2 是 MC-I 方法示意图。解码端先进行前后相邻 K 帧解码图像间的运动估计,获取准确的运动矢量场;再依据此运动矢量 V_1 及 W 帧所处位置来预测 W 帧的运动矢量,如图 2 中的 $\pm V_2$ 、 $\pm V_3$ 和 $\pm V_4$;最后根据 W 帧各自的预测运动矢量和前后帧解码图像,通过线性插值等方式获得解码边信息^[6,7]。鉴于运动矢量的空间相关性,文献[13]提出了基于双向预测补偿+空间平滑度约束的 MC-I 插值改进算法。为增强运动矢量场的有效性,该算

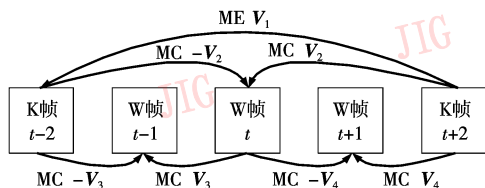


图 2 MC-I 内插算法重建边信息

Fig. 2 MC-I based reconstruction of side information

法首先对 K 帧重建图像进行低通滤波,然后在前后 K 帧间实施运动估计,并采用加权中值滤波平滑运动矢量场,以摒弃孤立的运动矢量。最后,该算法依据预测运动矢量,通过双向加权预测来插值边信息。实验结果显示该方法可将率失真性能提高 0.8dB 左右。

MC-I 算法与传统预测编码中 B 帧预测相类似,其预测精度较高。但是由于要用到后一个关键帧的重建图像,因此其解码顺序和输出顺序并不一致(decoded out-of-order);而且要等待下一个 K 帧的解码完成才能解码处于关键帧之间的 W 帧,其解码延时将不可避免。因此,MC-I 算法比较适合对实时性要求不高的应用场合中。

3.2 基于运动补偿的外插插值法(MC-E)

图 3 中的 MC-E 算法先计算 $t-2$ 和 $t-1$ 时刻重建图像间的运动矢量,再根据前后运动矢量一致性假设来线性外推 $t-1$ 至 t 时刻的运动矢量,并根据 $t-1$ 时刻的解码图像插值得到 t 时刻的边信息。

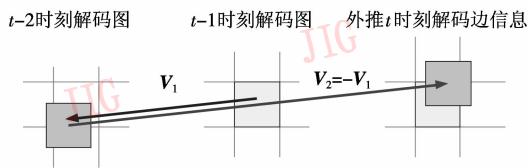


图 3 MC-E 插值法重建边信息

Fig. 3 MC-E based reconstruction of side information

MC-E 算法实际是直接前一时刻的运动矢量作为当前时刻的运动矢量,且仅有前面时刻的解码图像可作为参考帧。因此,MC-E 算法的预测精度较低。此外,当 K 帧之间嵌有多个 W 帧时,易出现预测精度逐级递减的问题,尤其是当相邻帧之间的运动比较剧烈、无规则的时候。但是为了实现低延时乃至实时解码,W 帧的解码边信息即可考虑采用外推插值方式。为提高 MC-E 算法的精度,文献[14]提出了采用块边缘重叠方式做运动估计,并把相邻块运动矢量的均值作为当前块的外推运动矢量,以增强外推的运动矢量场的有效性和空间平滑性。该算法可使率失真性获得 0.2dB 以上的提高。

3.3 基于 hash code 的运动估计补偿法(MC-H)

显然,在 W 帧自身信息未知的情况下,要准确地生成其解码边信息是非常困难的。倘若编码端能传送 W 帧的一些特征信息(如图像边缘、纹理等 hash code 信息),解码端以这些特征信息为依据进

行运动估计,则能增强运动矢量的有效性,提高边信息的预测精度,图4即为基于 hash code 的边信息重建示意图。文献[15]将高频 DCT 量化系数作为 hash code 信息,对其采用 VLC 编码并传到解码端。在解码端首先解码此 hash code 信息(即高频 DCT 量化系数),然后依据此高频 DCT 量化系数在解码端进行运动估计,并选取参考帧中的最佳匹配块作为解码边信息。

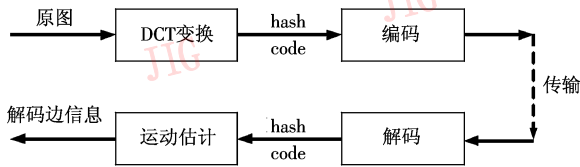


图4 加传 hash code 特征信息的示意图

Fig. 4 Hash code based reconstruction of side information

MC-H 算法的预测精度要高于 MC-E 和 MC-I, 提高了解码图像的客观质量, 但是 MC-H 算法也并非尽善尽美。首先, 如何挑择合适的特征信息, 使其既能很好地代表原始帧信息又不会占用过多的码率, 仍是值得研究的课题。文献[15]将高频 DCT 量化系数作为 hash code 信息, 则 hash code 信息的代表性随着量化步长的改变而改变。其次, 将 hash code 信息采用 VLC 编码严重地破坏了分布式编码的抗噪声鲁棒性, 使高频 DCT 量化系数失去了信道纠错码的保护。MC-H 算法与 MC-E 和 MC-I 算法的结合使用是一种有效途径。尤其是对 MC-E 算法, 若在解码端能利用一些特征信息进行运动估计, 则可大幅提高解码边信息重建质量。

4 关键技术之二: 高效编码压缩

虽然 Slepian-Wolf 理论已证明分布式视频编码可以获得良好的率失真性能, 但在实际系统中, 分布式视频编码的码率完全依靠解码端的反馈信息控制, 其率失真性能多数还达不到 H. 263 + 帧间预测编码的水平, 与 H. 264/AVC 的差距比较大^[3]。为了在不增加编码复杂度的同时提高分布式视频编码的率失真性能, 国内外学者做了大量的研究, 可以分为基于感兴趣区提取的分布式视频编码、基于预测残差编码的分布式编码等。

4.1 基于感兴趣区提取的分布式视频编码

若解码边信息和编码的 W 帧之间的相关性较

弱, 则解码端难以获得高质量的解码图像。鉴于此, 文献[16]设法在编码端分割出那些在解码端不能准确预测的区域(相关性较弱的区域), 如剧烈运动区、运动对象边缘区域等, 并加强对这些感兴趣区域的编码。该文提出了像素域感兴趣区提取算法, 即以前后帧相同位置像素值的差为依据, 结合使用权重模板来提取感兴趣区域, 该算法的率失真性能要比 H. 264 帧内预测编码高 3dB。

文献[17]、[18]则对相关性强弱的区域采用帧内编码, 在编码端计算当前块和参考帧相同位置块像素的绝对差之和(SAD); 在解码端计算前后 K 帧最佳匹配块的 SAD 值。若某块的 SAD 值较大, 则将该块采用帧内编码。最后联合编码端判定的块编码模式和解码端反馈回来的块编码模式, 进行 W 帧编码。该算法对“News”序列能获得 5dB 的改善。

文献[19]考虑在视频序列的前后帧中存在大量的相似块(如背景区、平滑区等), 若避免对视频序列前后帧中相同或相似块的编码, 则可大幅节省码率和编码时间。因此, 提出了一种 DCT 变换域的感兴趣区提取算法 QDCT, 即以前后帧中 DCT 量化系数的加权 SAD 值为依据来提取感兴趣区; 其率失真性能要优于 H. 263 + 帧间编码。

此外, 通过在编码端判断视频序列的时域相关性, 文献[20]、[21]等提出的算法可自适应地选择 K 帧编码的间隔和 W 帧的各种块编码模式(如 skip、intra 等), 提高编码率失真性能。为保持分布式视频编码的极低编码复杂度特性, 此类算法中的感兴趣区提取算法都比较直观、简单。

4.2 基于预测残差编码的分布式视频编码

文献[22]先对 W 帧进行 CR 预测^[23], 然后对预测残差进行 Slepian-Wolf 编码。该方案使分布式视频编码在编码端可以利用视频信号的部分时域相关信息进行编码, 虽然增加了一定的编码负担, 但却有效地提高了率失真性能。实验结果表明, 该算法的率失真性能要比无编码端预测的分布式视频编码高 2~3dB。文献[24]提出了基于网络驱动的分布式视频编码方法, 将原先的关键帧帧内编码改为帧间预测编码, 用以降低 K 帧的编码码率, 提高整体率失真性能。该算法在解码端进行运动估计, 并通过反馈信道将运动矢量传回至编码端, 在编码端根据传来的运动矢量来预测编码 K 帧。

虽然由解码端外推预测所提供的运动矢量并不像编码端进行运动估计时获得的运动矢量那么准

确,但是与原先的帧内编码相比,它利用了视频序列的时域相关性,能较好地提高率失真性能。该算法的 K 帧设置需相对密集,否则将大大降低运动矢量外推预测的有效性。此外,该算法对不同运动特征的视频序列效果相差比较大,对全局剧烈运动的 foreman 序列,率失真性能可提高 0.7 ~ 1.5dB,而对背景静止对象运动较缓和的 silent 序列,率失真性能的提高可达 5dB。

5 典型应用之一:低复杂度视频编码

5.1 无线视频的低复杂度编解码

由于分布式视频编码与传统视频编码具有互补性,因此,点对点无线移动视频信号的编解码与传输可采取如图 5 所示的方案。即发送方采用分布式视频编码压缩并传输视频流至网络中心结点,由网络中心结点将其进行转码,转换至 MPEG/H. 26X 码流

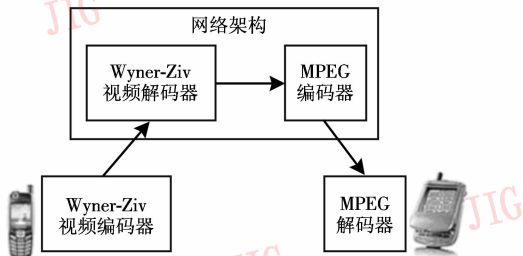


图 5 基于分布式编码的无线视频通讯
Fig. 5 Distributed video coding based wireless video communication

格式,而后再由网络中心结点将转码后的视频流传输给客户接收端。该系统方案的突出优点在于充分利用了网络中心结点强大的计算和存储能力,对终端设备而言,无论是发送方还是接收方,都只需进行低复杂度的编码与解码计算。

此外,分布式视频编码系统中,仅仅改善解码端边信息的插值质量即可大幅提高系统的率失真性能。这意味着在该无线视频通信系统中只需运营商改善网络中心节点的转码性能,就可使客户在无需升级更改现有设备的情况下,接收到更佳质量的视频服务。

5.2 低复杂度多视点视频编码

多视点视频是一个能够提供立体感和交互操作功能的新型视频技术^[25],在视频监视、影视娱乐等方面有广泛的应用前景。无线多视点视频编码需要采用低复杂度、低功耗的视频压缩算法。现有的多视点视频压缩算法^[26-28]由于编码计算复杂度很高,不能很好地适应无线多视点视频低复杂度编码的要求。为解决大相机阵列无线视频系统编码的问题,Griod 等人提出基于分布式视频编码的低复杂度多视点视频压缩方法^[29],尝试了对同一时刻下的不同视点图像采用分布式编码,其率失真性能仅仅略优于 JPEG 2000,与主流视频编码标准的编码性能差距较大。此外,Fujii 等人也分别提出了密集相机环境下的无线多视点视频编码系统^[30-33],其率失真性能与 H. 263 + 的帧内编码相当,仍有待改进。

图 6 为基于分布式视频编码的大相机阵列低复杂度视频压缩框图^[34]。它利用前后帧之间 DCT 量

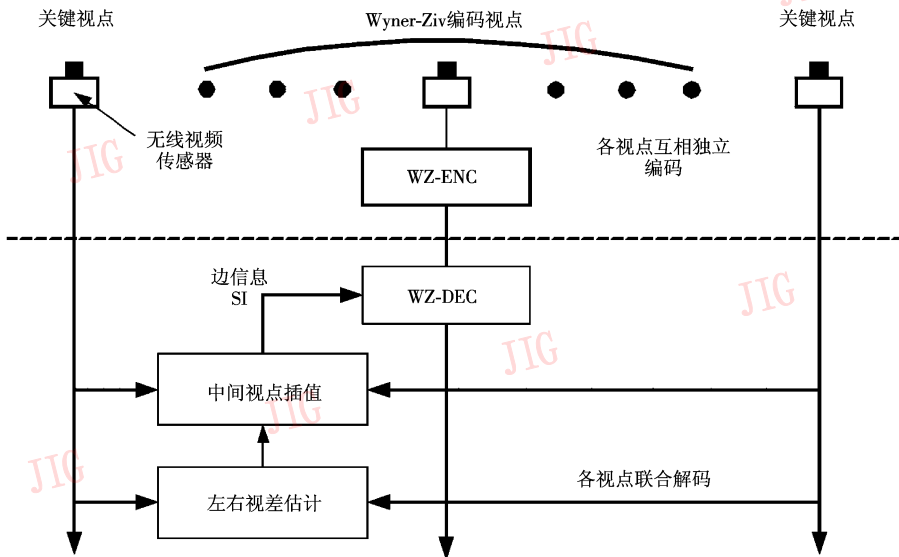


图 6 基于 Wyner-Ziv 理论的多视点视频压缩
Fig. 6 Wyner-Ziv theory based multiview video compression

化系数相似性来捕获需编码的感兴趣区域,以提高编码率失真性能,解决基于分布式视频编码的多视点视频编码算法压缩效率不高的问题。在解码端,算法对左右关键视点解码图像进行双向视差估计和视差校正补偿,并插值生成中间视点的解码边信息。该算法有极低的编码复杂度和良好的率失真性能。

6 典型应用之二:鲁棒传输

MPEG 和 H.26X 等都采用预测编码技术,虽可实现高效的编码压缩,但是其码流在噪声信道上的传输会因为误码、丢包而导致重建视频质量的下降。为了在噪声信道上实现视频鲁棒传输,通常采用 FEC、ARQ 等技术对码流中的关键信息加以保护。ARQ 本身是一种非常有效的抗噪措施,它根据解码器的反馈信息重传丢失包,不会浪费带宽。但是由于重传丢失包必然导致延时,因此 ARQ 不适合应用于实时解码系统。FEC 则是通过加入冗余校验信息来实现检错和纠错。但是当信道的出错率超出 FEC 的纠错能力时,会发生“崩溃”现象(“cliff” effect),严重削弱解码图像质量,而且仅仅保护码流中的关键信息是不够的,因为在预测编码中残差数据的丢失也会严重影响到解码图像的质量。

分布式视频编码实际上属于信源信道联合编码技术^[12],具有天生的传输鲁棒性及纠错能力,可应用于数字视频传输的错误恢复。分布式视频编码将解码边信息理解为 W 帧被噪声污染后的信息,其本质是通过校验码去纠正 W 帧和解码边信息之间的“错误”。文献[35]~[37]显示传输错误对传统帧间预测编码的影响很大,且可能导致解码错误的帧间蔓延;而分布式视频编码可将由信道噪声带来的影响控制在最小的范围内,避免了灾难性的解码错误。利用分布式视频编码是信源信道联合编码技术的特点,文献[38]提出了将其用于数字视频的鲁棒传输及错误恢复。进一步,文献[39]、[40]提出了 LWZ 编码(layered Wyner-Ziv scheme),用于噪声信道视频信号传输的差错保护。视频信号分基本层和增强层两路同时进行编码与传输,视频信号经传统编码标准压缩后作为基本层信息;增强层为视频信号经粗量化后的 Wyner-Ziv 编码码流。解码时,将基本层的解码图像作为 Wyner-Ziv 解码的边信息,用以纠正传统编码标准在解码时的传输错误,获取更好质量的解码图像。如果没有传输错误,则增

强层的 Wyner-Ziv 编码码流是完全冗余的。在相同码率下,LWZ 编码比传统的使用 FEC 等差错控制技术有更强的纠错能力。

文献[41]等进一步提出了嵌套式 LWZ 编码的思想,即在粗量化的 Wyner-Ziv 编码器 A 内再嵌入一个精细量化的 Wyner-Ziv 编码器 B。精细量化的 Wyner-Ziv 编码器 B 将 Wyner-Ziv 编码器 A 的解码图像作为边信息,对解码图像再做更精细的纠错解码,以进一步提高解码图像质量。LWZ 编码具有非常好的传输鲁棒性,但是与单层编码相比,码率显得过大。原因之一是现有的算法中只利用了基本层(或底下几个增强层)的解码图像作为解码边信息,而并没有利用视频邻近帧之间的相关性信息。文献[42]充分利用视频图像的时域相关性,由相邻帧解码图像和本帧基本层解码图像共同生成增强层的解码边信息,改善率失真性能。实验结果显示,该算法的率失真性能要比没有利用时域相关性的 LWZ 算法高 0.5 dB。

此外,文献[43]将分布式视频编码引入到 JPEG2000 的 ROI 编码压缩中,提高其压缩效率和传输鲁棒性;实验证明,该算法可使率失真性能获得 1~2 dB 的提高。文献[44]、[45]等提出了 WZS(Wyner-Ziv scalable)编码,即将 Wyner-Ziv 编码引入到可分级编码中,作为可分级编码的增强层编码;结果表明,WZS 的率失真性能要比传统的可分级编码高 2 dB 左右。

7 结论

分布式编码是对传统视频编码方法的革新,它在编码复杂度、码流传输鲁棒性等方面具有明显的优势,因此受到国内外越来越多学者的重视。分布式视频编码采用帧内编码帧间预测解码方式,将计算复杂度成功地由编码端转移到解码端,可以实现极低复杂度的视频编码。与传统的基于运动估计补偿的混合编码相比,分布式编码的计算复杂度降低了 10 倍以上,适合于无线终端的视频编码与传输。

分布式视频编码其本质是一种信源信道联合编码技术,对信道噪声污染有与生俱来的强鲁棒性。它从编码原理上解决了传统视频编码标准中的预测误差匹配问题,克服了其码流传输脆弱的缺点。分布式视频编码的这些独特优点使其可被广泛应用于视频信号的鲁棒传输与错误恢复。分布式视频编码目

前正处于探索研究阶段,有许多问题亟待研究,同时也提供了许多富有挑战性的研究课题:

(1) 研究提高解码边信息对 W 帧的预测精度,尤其是提高 MC-E 算法的预测精度。

(2) 研究提高分布式视频编码的率失真性能,缩小与 H. 264 等先进视频编码的差距。

(3) 研究完善解码端纠错码的信道模型估计算法。

我们相信,随着研究的逐步深入,分布式视频编码将不断地得到提高和完善。

参考文献 (References)

- JVT-G050, Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG[S].
- Ostermann J, Bormans J, List P, *et al.* Video coding with H. 264 / AVC: tools, performance, and complexity [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2004, 4(1): 7 ~ 28.
- Girod B, Aaron A, Rane S, *et al.* Distributed video coding[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(1): 71 ~ 83.
- Slepian J D, Wolf J K. Noiseless coding of correlated information sources [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19(4): 471 ~ 480.
- 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.
- Aaron A, Rane S, Setton E, *et al.* Transform-domain Wyner-Ziv codec for video[A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing 2004[C], San Jose, California, USA, 2004: 520 ~ 528.
- Aaron A, Setton E, Girod B. Towards practical Wyner-Ziv coding of video[A]. In: International Conference on Image Processing[C], Barcelona, Spain, 2003, 3: 869 ~ 872.
- Sun J, Li H. Motion compensated Wyner-Ziv video coding[A]. In: International Workshop on Multimedia Signal Processing[C], Shanghai, China, 2005: 1 ~ 4.
- Aaron A, Girod B. Compression with side information using turbo codes[A]. In: Data Compression Conference[C], Snowbird, Utah, USA, 2002: 252 ~ 261.
- Sehgal A, Jagohan A, Ahuja N. Wyner-Ziv coding of video: an error-resilient compression framework[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2004, 6(2): 249 ~ 258.
- Pradhan S S, Ramchandran K. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): Design and construction[A]. In: Proceedings of Data Compression Conference[C], Snowbird, Utah, USA, 1999: 158 ~ 167.
- Rane S, Aaron A, Girod B. Systematic lossy forward error protection for error resilient digital video broadcasting[A]. In: IEEE International Conference on Image Processing[C], Singapore, 2004: 3101 ~ 3104.
- Ascenso J, Brites C, Pereira F. Improving frame interpolation with spatial motion smoothing for pixel domain distributed video coding [EB/OL]. [http://www. img. lx. it. pt/~ fp/artigos/EURASIP05_DVC_final. pdf.](http://www.img.lx.it.pt/~fp/artigos/EURASIP05_DVC_final.pdf)
- Natário L, Brites C, Ascenso J. Extrapolating side information for low-delay pixel-domain distributed video coding[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3893: 16 ~ 21.
- Aaron A, Rane S, Girod B. Wyner-Ziv video coding with hash-based motion compensation at the receiver[A]. In: IEEE International Conference on Image Processing[C], Singapore, 2004: 3097 ~ 3100.
- Yaman S, AlRegib G. A low-complexity video encoder with decoder motion estimator[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Montreal, Canada, 2004, 3: 157 ~ 60.
- Tagliasacchi M, Trapanese A. Intra mode decision based on spatio-temporal cues in pixel domain Wyner-Ziv video coding[A]. In: International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C], Toulouse, France, 2006, 2: 57 ~ 60.
- Trapanese A, Tagliasacchi M. Embedding a block-based intra mode in frame-based pixel domain Wyner-Ziv video coding[EB/OL]. [http:// www. img. lx. it. pt/~ fp/artigos/VLVB2005_WZ_mode_decision_final. pdf.](http://www.img.lx.it.pt/~fp/artigos/VLVB2005_WZ_mode_decision_final.pdf)
- Jiang G, Jin Z, Yu M, *et al.* New approach to wireless video compression with low complexity[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4179: 485 ~ 492.
- Liang K, Sun L, Zhong Y. Adaptive distributed video coding for video applications in ad-hoc networks[A]. In: Pacific-Rim Conference on Multimedia[C], Jeju Island, Korea, 2005: 455 ~ 465.
- Yang F, Ding G, Dai Q, *et al.* Adaptive key frame selection Wyner-Ziv video coding[A]. In: Proceedings of International Workshop on Multimedia Signal Processing 2005[C], Shanghai, China, 2005: 1 ~ 4.
- Aaron A, Varodayan D, Girod B. Wyner-Ziv residual coding of video [A]. In: Proceedings of Picture Coding Symposium 2006[C], Beijing, China, 2006.
- Rabiner W, Chandrakasan A. Network-driven motion estimation for wireless video terminals[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1997, 7(4): 644 ~ 653.
- Liu L, Liu Y, Delp E. Network-driven Wyner-Ziv video coding using forward prediction[A]. In: Proceedings of SPIE Image and Video Communications and Processing 2005 [C], San Jose, California, USA, 2005: 641 ~ 651.
- Na B, Fujii T, Tanimoto M. Experimental system of free viewpoint television[A]. In: Proceedings of IS&T SPIE Electronic Imaging 2003[C], Santa Clara, California, USA, 2003: 554 ~ 563.
- ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N6909, Survey of algorithms used for MVC[S].
- ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, N8019. Description of core experiments in MVC[S].

- 28 Lopez J, Kim J, Ortega A, *et al.* Block-based illumination compensation and search techniques for multiview video coding[A]. In: Proceedings of Picture Coding Symposium[C], San Francisco, USA, 2004: 509 ~ 514.
- 29 Zhu X, Aaron A, Girod B. Distributed compression for large camera arrays[A]. In: Proceedings of IEEE Workshop on Statistical Signal Processing[C], St Louis, Missouri, USA, 2003: 30 ~ 33.
- 30 Tehrani M, Fujii T, Tanimoto M. Distributed source coding of multi-view images[A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing 2004[C], San Jose, California, USA, 2004, **5308**: 300 ~ 309.
- 31 Toffetti G, Tagliasacchi M, Marcon M, *et al.* Image compression in a multi-camera system based on a distributed source coding approach [EB/OL]. <http://www.elet.polimi.it/upload/tagliasa/publications.htm>.
- 32 Guo X, Lu Y, Gao W, *et al.* Distributed multi-view video coding [A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing 2006 [C], San Jose, California, USA, 2006, **6077**: 290 ~ 297.
- 33 Guo X, Lu Y, Wu F, *et al.* Free viewpoint switching in multi-view video streaming using Wyner-Ziv video coding[A]. In: Proceeding of SPIE Visual Communications and Image Processing 2006 [C], San Jose, California, USA, 2006, **6077**: 298 ~ 305.
- 34 Jin Z, Yu M, Jiang G, Low complexity video compression in dense camera array[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, **11**(11): 78 ~ 82. [金智鹏, 郁梅, 蒋刚毅. 一种密集相机阵列的低复杂度视频压缩方法[J]. 中国图象图形学报, 2006, **11**(11): 78 ~ 82.]
- 35 Puri R, Ramchandran K. PRISM: An uplink-friendly multimedia coding paradigm[A]. In: Proceeding of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Hong Kong, 2003, **4**: 856 ~ 859.
- 36 Puri R, Ramchandran K. PRISM: A 'reversed' multimedia coding paradigm[A]. In: proceedings of International Conference on Image Processing[C], Barcelona, Spain, 2003: 617 ~ 620.
- 37 Sehgal A, Ahuja N. Robust predictive coding and the Wyner-Ziv problem[A]. In: Proceedings of Data Compression Conference[C], Snowbird, Utah, USA, 2003: 103 ~ 112.
- 38 Shamai S, Verdú S, Zamir R. Systematic lossy source/channel coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, **44**(2): 564 ~ 579.
- 39 Aaron A, Rane S, Zhang R, *et al.* Wyner-Ziv coding for video: Applications to compression and error resilience[A]. In: Proceedings of Data Compression Conference[C], Snowbird, Utah, USA, 2003: 93 ~ 102.
- 40 Xu Q, Xiong Z. Layered Wyner-Ziv video coding[A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing 2004[C], San Jose, California, USA, 2004, **5308**: 83 ~ 91.
- 41 Rane S, Aaron A, Girod B. Systematic lossy forward error protection for error resilient digital video broadcasting—a Wyner-Ziv coding approach[A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing[C], Singapore, 2004: 3101 ~ 3104.
- 42 Ding G, Dai Q, Yin Y, *et al.* Scalable video coding based on Wyner-Ziv framework[A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing 2005 [C], Beijing, China, 2005, **5960**: 517 ~ 524.
- 43 Ding G, Dai Q, Yang F, *et al.* A new region-of-interest image compression method based on Wyner-Ziv coding[A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing 2005 [C], Beijing, China, 2005: 849 ~ 856.
- 44 Sehgal A, Jagmohan A, Ahuja N. Scalable video coding using Wyner-Ziv codes [EB/OL]. http://www.ece.ucdavis.edu/PCS2004/pdf/ss_email%20284_SehgalJApcs2004.pdf.
- 45 Wang H, Ortega A. Scalable predictive coding by nested quantization with layered side information [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Singapore, 2004, **3**: 1755 ~ 1758.