

高效率视频编码中基于块整合的错误隐藏算法

高文华, 张义云*, 王海东

(太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024)

(*通信作者电子邮箱 hangyiyun1123@163.com)

摘要:针对新一代视频编码标准高效率视频编码(HEVC)编码单元(CU)尺寸较大所导致的丢包后错误隐藏恢复效果不佳的问题,提出了对CU下的分割块进行块融合的错误隐藏方法。首先,分析了残差能量与块分割的相关性;然后,通过参考帧残差能量与所设阈值进行比较判决,对当前丢失CU分割块进行融合,得到丢失CU的块分割方式;其次,对矢量外推法进行权值优化,保证了算法在HEVC错误隐藏的适用性;最后,对融合块采用优化后的矢量外推法进行错误隐藏。实验结果表明,与经典错误隐藏方法如拷贝法、运动补偿法等相比,基于块融合的错误隐藏在保证解码视频结构相似性(SSIM)的同时提高了不同运动性的解码视频峰值信噪比(PSNR),验证了算法的可行性。

关键词:高效率视频编码;编码单元;残差能量;块融合;矢量外推

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Error concealment for high efficiency video coding based on block-merging

GAO Wenhua, ZHANG Yiyun*, WANG Haidong

(College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: The Coding Unit (CU) size in High Efficiency Video Coding (HEVC) is more times than that in previous coding standards, so the error concealment in HEVC has a poor result in video decoding when packet loss occurs. An error concealment method based on block-merging of segmentation block under CU was proposed. Firstly, the correlation between residual energy and block segmentation was analyzed. Secondly, the reference frame residual energy was compared with a set threshold, and the lost CU segmentation block was merged based on the comparison information. Then, the vector extrapolation method was optimized by weights to ensure the applicability of the proposed algorithm in HEVC error concealment. Finally, the optimized vector extrapolation method was used for error concealment of merged block. The experimental results show that, compared with the classic error concealment methods such as the methods of copy, motion compensation, the proposed method guarantees the Structural Similarity Index Measurement (SSIM) of decoded video and improves the Peak Signal-To-Noise Ratio (PSNR) of decoded video in different motility, and the feasibility of the proposed algorithm is verified.

Key words: High Efficiency Video Coding (HEVC); Coding Unit(CU); residual energy; block-merging; motion vector extrapolation

0 引言

新一代视频编码技术——标准高效率视频编码(High Efficiency Video Coding, HEVC)由ITU-T的视频编码专家组联合项目和ISO/IEC运动图像专家组共同成立的工作小组JCT-VC提出,作为H.264/AVC的继任者,HEVC旨在减少传输和存储成本而不降低视频质量。

在网络传输过程中,视频数据包的丢包现象是由多种原因而导致的,如网络传输的延迟、拥塞、带宽限制等^[1]。然而,对丢包数据如何进行恢复,是视频实时传输所面临的巨大挑战。在这种情况下,错误隐藏技术应用而生。之前的编码标准H.264下已经提出许多优秀的错误隐藏方法,如:双线性插值算法^[2]、基于线性分割的边界插值算法^[3-4]、图像修复法^[5]等,均利用丢失块邻近像素进行插值恢复;边界匹配算法^[6-7]、重叠边界匹配算法^[8]等,利用丢失块周围像素在参考

帧内进行最佳匹配块选择。但针对H.264的错误隐藏方法通常设计目的是为恢复较小尺寸块的丢失,且通常采用丢失宏块邻近的正确接收的像素作为参考。

尽管HEVC仍是基于块的运动补偿和变换编码结构,但在编解码中并没有宏块的概念,而是将宏块的概念定义为三种类型的可变大小的扩展单元:编码单元(Coding Unit, CU)、预测单元(Prediction Unit, PU)和变换单元(Transform Unit, TU)^[9]。最大的编码单元(Largest CU, LCU)允许每个CU可递归分割为多个子CU,尺寸从64×64(CU Depth=0)到8×8(CU Depth=3)。每个子宏块可进一步分为多个PU。

HEVC中CU尺寸超过现有H.264标准中16×16宏块尺寸的16倍,因此HEVC的数据包丢失将涉及到大面积的恢复误差。在HEVC中,传输时一旦产生丢包将丢失多个CU的信息,使得丢失块中大部分丢失的像素信息与周围正确接收的像素信息距离变大,直接采用现有的H.264错误隐藏方法

收稿日期:2014-12-18;修回日期:2015-03-25。 基金项目:山西省基础研究项目(2012011015-4)。

作者简介:高文华(1967-),女,山西繁峙人,教授,博士,主要研究方向:智能信息处理; 张义云(1988-),男,山西繁峙人,硕士研究生,主要研究方向:视频通信; 王海东(1978-),男,山西太原人,博士,主要研究方向:视频通信。

导致恢复效果显著下降。

文献[10]中指出虽然 HEVC 的设计是为实现包括提高编码效率、传输系统易集成和数据丢失检测,但它对传输视频的再现质量不提供任何保护,也没有提出传输存在错误时对错误如何隐藏。目前,国内外针对 HEVC 的错误隐藏研究仍处于起步阶段。文献[11]中对 H. 264 的经典错误隐藏方法进行改进,对 HEVC 中不同尺寸下的分割块分别采用双线性插值法和外边界匹配法进行错误隐藏,具有较好的恢复效果;但只针对随机 CU 丢失进行了理论验证,在实际丢包下的错误隐藏适用性不足。文献[12]对比了矢量外推法^[13]在 HEVC 和 H. 264 中的适用性,研究表明,在 HEVC 中采用矢量外推法需要考虑 HEVC 的块分割问题,而且需要对矢量外推法进行权值修正才能获得较好的恢复效果。文献[14]采用参考帧残差能量来预测当前丢失 CU 的块分割模式,对 CU 内分割块进行融合后采用运动补偿法(Motion Compensated Error Concealment, MCEC)进行恢复,与直接拷贝法(Copy)相比恢复得到了提高;但在实验结果中可知,MCEC 法恢复效果在 HEVC 中适用性较差。

本文主要针对因网络丢包所导致的解码错误,采用文献[14]的块融合思想,对文献中块融合方式进行改进,以提高块融合的可行性;并对融合块采用矢量外推法进行错误隐藏,对矢量外推法采用本文所提出的权值法进行优化,进一步提高错误隐藏恢复效果。

1 错误隐藏

本文方法在执行错误隐藏时首先判断当前存在丢包帧的类型,如果是 I 帧丢失,则直接拷贝前一帧;如果是 P 帧丢失,则采用如下所述的方式进行错误隐藏:由于丢失块 CU 尺寸较大,若直接对丢失块恢复将导致较大的恢复误差,因此,需要对丢失块划分为具有一致性运动矢量的小尺寸分割块,然后对小尺寸的分割块采用错误隐藏算法,以提高恢复的精确性。

1.1 残差信息与块分割方式

残差信息是指当前解码帧在编码时利用其参考帧进行编码预测后仍存在的差值。如图 1 所示,图 1(a)为某解码帧的残差图:灰色部分代表残差为 0,具有纹理部分代表残差非 0 区域;图 1(b)为解码帧的块分割方式。由两图的对比可以发现,在残差较大的区域,块划分得更精细;在残差较小或为 0 的区域几乎不进行块划分。图 1 可以表明,残差信息能很好地反映块的分割信息。

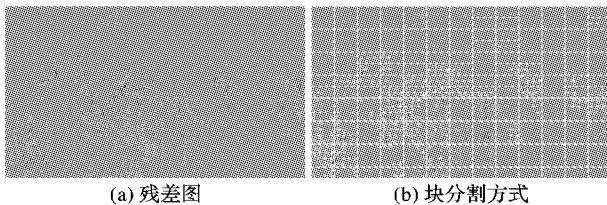


图 1 残差图及对应的块分割模式

设定存在丢失块的解码帧为当前帧,则可根据当前帧的解码信息来确定当前帧的参考帧,以寻找丢失块的并置块(在参考帧中与当前丢失块处于同一位置并具有同样尺寸的块)。本文采用并置块的残差信息来近似估计丢失块的分割方式:由于丢失帧与参考帧具有很大相似性,因此,当参考帧正确接收时,根据并置块的残差能量通过一定计算并通过块

融合方式可以近似估计丢失块的分割方式^[14]。

1.2 块融合

HEVC 的 CU 尺寸为 64×64 大小。在对每个丢失的 CU 进行恢复时,需要对 CU 块进行块划分,对划分后的小尺寸块进行错误隐藏可以提高恢复 CU 内图像的细节效果。但在块划分后进行恢复时,对存在边界尺寸小于 8 的划分块进行恢复时会导致恢复图像的块效应,因此,在考虑恢复细节效果与块效应的双重影响下,本文经实验验证,最终确定块融合的范围在 16×16 时整体恢复效果达到最佳。

进行块融合时,首先对并置块 CU 划分为尺寸为 16×16 的融合范围,让每次融合在同一融合范围内进行,同时保证了算法的可行性。本文方法通过两次融合来确定最终的分割方式,具体执行方式如图 2 所示。

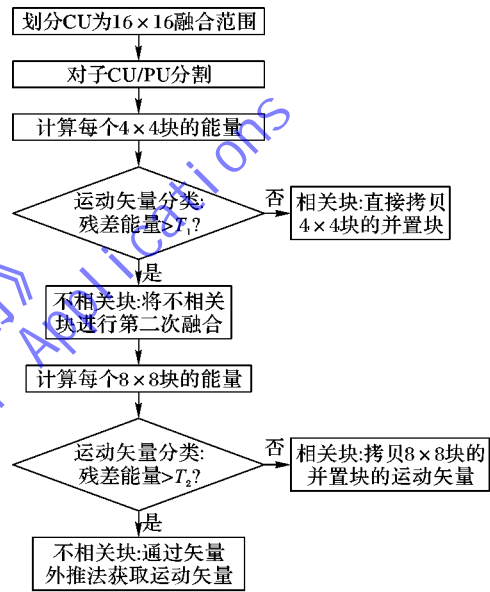


图 2 块融合流程

第一次融合:将每个 16×16 的融合范围再划分为 4 个 8×8 的子 CU 块,然后将子 CU 再划分为 4×4 的 PU 块,通过式(1)计算每个 PU 块的亮度残差能量 E_1 ,然后将残差能量 E_1 与阈值 T_1 进行比较:若 $E_1 < T_1$,将 4×4 块作为一个相关块;若 $E_1 \geq T_1$,则认为 4×4 块为不相关块。然后进行如图 3 所示的融合过程:白色块代表相关块,灰色块代表不相关块。当在每个 8×8 的子 CU 块内存在 2 个或 2 个以上的不相关块时,此时将 8×8 的子 CU 块作为一个新的 8×8 不相关块,如图 3(a)~(c)所示;当在每个 8×8 的子 CU 块内存在 3 个或 3 个以上的相关块时,此时将 8×8 的子 CU 块作为一个新的 8×8 相关块,如图 3(d)所示。此时,将得到的相关块采用直接拷贝法进行恢复,对于不相关块进行第二次判断融合。

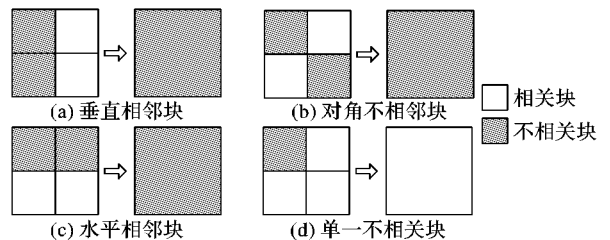


图 3 4×4 块融合示意图

$$E = \sum_{(i,j)} |r_Y(i,j)| \quad (1)$$

其中: r_y 代表所计算的块中每个像素点的亮度值; i, j 代表像素点位置。

第二次融合: 通过式(1) 计算每个新的 8×8 不相关块的亮度残差能量 E_2 然后将残差能量 E_2 与阈值 T_2 进行比较: 若 $E_2 < T_2$, 将不相关块作为一个新的相关块; 若 $E_2 \geq T_2$, 将不相关块再次作为新的不相关块。然后将得到的不相关块进行第二次融合, 如图4所示: 将相邻的不相关块融合为一个整体, 作为新的不相关块, 如图4(a)、(b)所示; 若没有相邻的不相关块则不进行融合, 如图4(c)、(d)所示。此时, 第二次融合所得到的相关块的运动矢量通过拷贝并置块的运动矢量获得, 其中并置块的运动矢量大小等于并置块内所包含的 4×4 块求运动矢量平均值(运动矢量以 4×4 块大小存储); 对于第二次融合得到的不相关块, 采用矢量外推法来获得运动补偿矢量。

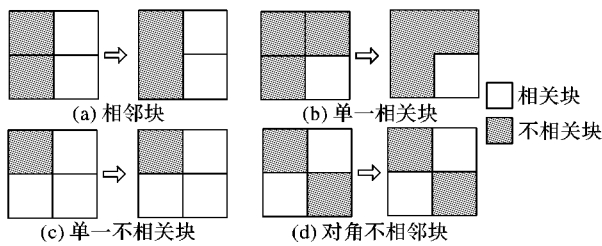


图4 8×8 块融合示意图

1.3 矢量外推法

对第二次融合的不相关块采用矢量外推法获得运动矢量首先需要确定融合块的外推矢量, 本文所用外推矢量是对融合块的并置块内运动矢量求矢量均值获得, 矢量均值化处理是对并置块内相同尺寸块的运动矢量分别求水平方向矢量 MV_{hor} 均值和垂直方向 MV_{ver} 矢量平均值, 然后对求平均后的运动矢量乘以参数 λ 。如图5所示, 融合后不相关块的外推矢量为 MV_{ex} , 其并置块内所包含的 4×4 块的运动矢量为 $MV(i) (i = 1, 2, \dots, 12)$ 。

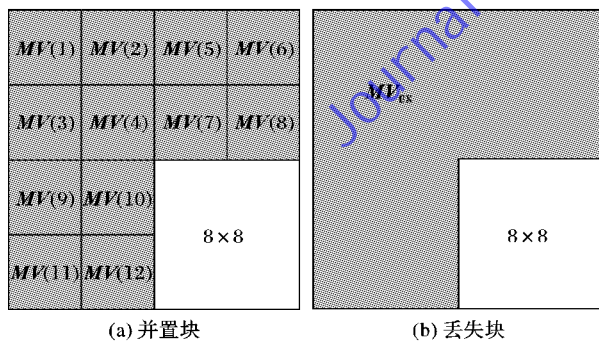


图5 外推矢量计算示意图

$$\begin{cases} MV_{EXhor} = \frac{\sum_{i=1}^{12} MV(i)_{hor}}{12} * \lambda \\ MV_{EXver} = \frac{\sum_{i=1}^{12} MV(i)_{ver}}{12} * \lambda \end{cases} \quad (2)$$

外推矢量的计算如式(2)所示, 其中 $\lambda \in (0, 1)$ 。

由于在融合范围内直接对矢量求平均值会使得区域内的运动矢量具有一致性, 如果在融合范围内各个子块的运动矢量差异较大, 则直接求平均值会使得恢复效果变差。因此, 需要对矢量求平均值后进行小幅度的调整: 对于整体运动性较

小的视频序列, 采用较大的 λ ; 而对于整体运动性较强的视频序列, 采用较小的 λ 。当 $\lambda = 0$ 时, 运动矢量均值为0, 此时相当于直接拷贝法; 当 $\lambda = 1$ 时, 运动矢量相当于求平均值获得。

本文采用了文献[15]的矢量外推法, 如图6所示, f_n 为当前帧, 灰色块表示当前丢失块, 将丢失块在参考帧 f_{n-1} 上进行投影, 分别计算与参考帧重叠部分所占的权重值 $\omega(i)$ (其中 $i = 1, 2, 3, 4$; 权重值为投影宏块面积在其重叠宏块中所占的比例)。根据权重值及重叠宏块的运动矢量 $MV(i)$ 计算得到当前丢失块的运动矢量 MV_{pred} , 如式(3)所示:

$$MV_{pred} = \sum_i \omega(i) * MV(i) / \sum_i \omega(i); i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

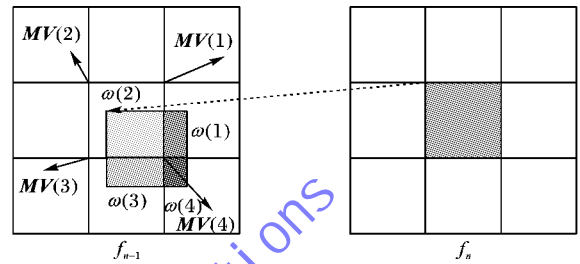


图6 矢量外推法

以上所述为 8×8 块的矢量获取方式, 由于进行融合处理后存在多种形式的块, 对于非 8×8 块仍按照 8×8 块矢量获取方式进行投影。如图7所示, 根据融合块的外推矢量获取方式可知, 融合块内所包含的 Block1、Block2、Block3 三个 8×8 块具有相同的外推矢量, 对 Block1、Block2、Block3 分别进行矢量外推来计算得到其各自的运动矢量, 然后通过求矢量均值得到融合块的运动矢量 MV_{pred} 。

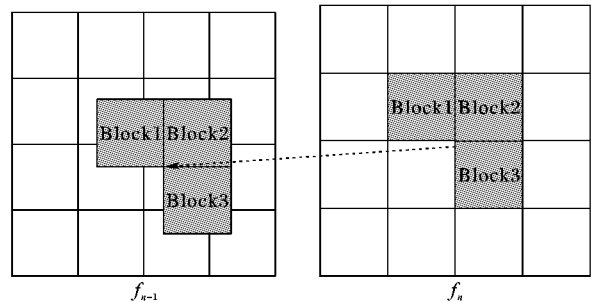


图7 融合块的矢量外推

2 实验分析

本文算法与 Copy 法、MCEC 法及基于块融合的运动补偿法 (Motion Compensated Based on Block-Merging, MCBM)^[14] 进行了对比, 实验采用尺寸为 2560×1600 的 Traffic 和 SteamLocomotiveTrain 作为测试序列。在 HM10^[16] 中设置参数 GOP 为 8, QP 为 32, 40 个 LCU 为一个 Slice, 参考帧设置为当前帧的前一帧, 以 IPPP 帧的编码方式对整个序列进行编码。残差能量的阈值及参数 λ 的设定依赖于测试序列, 对不同的测试序列需要调整。对于 MCBM 法的错误隐藏亦采用了本文的融合方式, 对 MCEC 法采用了直接求平均值的方式进行了范围为 16×16 的块融合。

本次实验序列统一设定 4×4 块残差的融合阈值 $T_1 = 50$, 8×8 块残差的融合阈值 $T_2 = 200$ 。经过对残差矩阵的分析可以发现, 图像序列的残差值取值范围为 $(-127, 127)$, 然而在本文算法中所采用的是残差能量值, 因此首先对每个像素点的残差值取绝对值, 然后进行求和和计算得到相应块的残

差能量和。对本文实验序列所得到的残差能量分析可知,在整帧图像内,4×4块残差能量值小于50的4×4块与8×8块残差能量值小于200的8×8块各自占80%左右,在此阈值下可得到最佳恢复效果。矢量均衡值 λ 采用启发式搜索法得到,在对取值从0到1进行步长为0.05的递进法逐步验证,确定序列Traffic的 λ 取值为0.45,序列Train的 λ 取值为0.55时使恢复效果达到最佳。

表1列出了在不同丢包率下几种方法对存在丢失块的解码帧进行恢复的实验结果。由于后续解码依赖于当前的恢复帧,如果当前帧恢复效果提高,则后续错误扩散将会相应减小,因此表1只对所有恢复帧与原始图像的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)及结构相似性(Structural

Similarity Index Measurement, SSIM)进行了比较。从表1中可以看出, Traffic序列中,在丢包率为2%时,本文方法与Copy法相比, PSNR提高约0.48 dB;本文方法与MCBM法相比, PSNR提高约0.3 dB。Train序列中,在丢包率为2%时,本文方法与Copy法相比, PSNR提高约1.14 dB;本文方法与MCBM法相比, PSNR提高约0.3 dB。通过对表1分析可发现,对整体运动性较小且运动较为单一的Train序列有较好的恢复效果,对整体运动性较大且运动复杂的Traffic序列恢复性能提高较小;对SSIM的比较可以发现,本文方法所导致的块效应影响对图像恢复效果未带来较大影响,且图像结构性有较小提升,并且,随着丢包率的增加,本文恢复性能在逐步提高。

表1 不同丢包率下实验结果

丢包率/%	Traffic 序列							
	Copy		MCEC		MCBM		本文方法	
	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM
0.50	37.8794	0.9773	37.8770	0.9773	38.0342	0.9776	38.1705	0.9781
1.00	37.0823	0.9760	37.0630	0.9759	37.2500	0.9763	37.4928	0.9772
1.50	36.7491	0.9755	36.7288	0.9754	36.9000	0.9758	37.2141	0.9768
2.00	36.1102	0.9735	36.0769	0.9734	36.2975	0.9738	36.5940	0.9748
丢包率/%	Train 序列							
	Copy		MCEC		MCBM		本文方法	
	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM	PSNR/dB	SSIM
0.50	39.8525	0.9796	39.8232	0.9795	40.3971	0.9816	40.4683	0.9818
1.00	39.2274	0.9747	39.1464	0.9742	39.8575	0.9779	40.0299	0.9784
1.50	38.4463	0.9689	38.3415	0.9683	39.2361	0.9738	39.5446	0.9747
2.00	37.8349	0.9617	37.7409	0.9610	38.6646	0.9688	38.9739	0.9699

表2 对单独帧的恢复效果

测试序列	存在丢包帧数	方法	PSNR/dB
Traffic	12	Copy	36.2775
		MCEC	36.2677
		MCBM	36.4014
		本文方法	36.7121
Train	44	Copy	38.0816
		MCEC	38.0330
		MCBM	38.5189
		本文方法	38.9577

表2列出了对两种序列在同为0.5%的丢包率下本文方法和其他几种算法对于随机单帧图像的恢复效果: Traffic序列中,本文方法与Copy法相比, PSNR提高约0.48 dB;本文方法与MCBM法相比, PSNR提高约0.31 dB。Train序列中,本文方法与Copy法相比, PSNR提高约0.87 dB;本文方法与MCBM法相比, PSNR提高约0.44 dB。

图8列出了序列Traffic在丢包率为0.5%时第12帧在4种错误隐藏方法下的部分细节恢复效果:图8(a)是正确解码图像,图8(b)是丢包后无错误隐藏解码图像,图8(c)为原始图像细节,图8(d)~(g)为四种错误隐藏方法下的部分细节恢复效果。从图8中可以看出,进行矢量平均后的MCEC法(图8(e))与Copy法(图8(d))相比恢复效果差别不大;MCBM法(图8(f))恢复图像的PSNR较Copy法和MCEC法有所提高,但在局部运动复杂区域,由于融合导致恢复图像的块效应,本文方法(图8(g))在提高恢复图像PSNR的同时有

效降低了块效应影响。

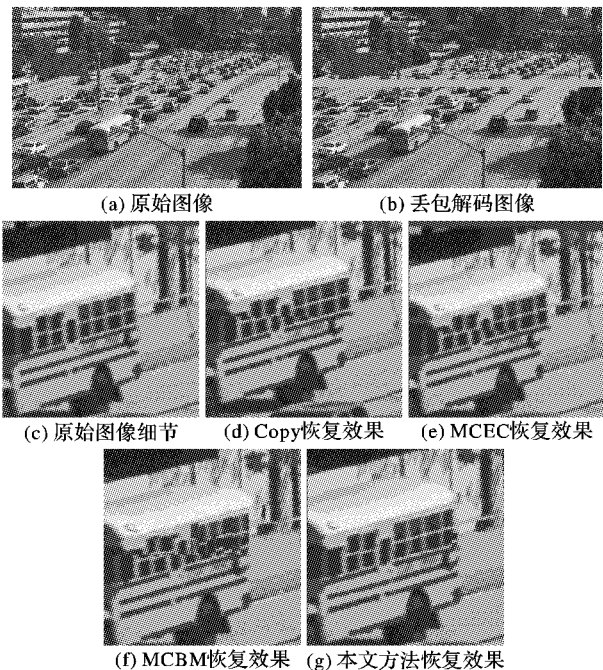


图8 Traffic序列第12帧的部分细节恢复效果

3 结语

本文算法基于HEVC的块分割问题,利用参考帧残差能量来预测当前丢失CU的块分割方式,对分割块进行融合后采用矢量外推法来得到融合块的运动补偿矢量,对文献[14]

的块融合方法进行了改进,提高了块融合的可行性,并对矢量外推法采用权值法优化后提高了算法在 HEVC 中的适用性。

本文算法仍需改进的是对块融合的处理:算法中块融合只在 16×16 的范围内进行,可能存在两个 16×16 块边界处的融合,由于实现复杂性较高本算法未予以考虑;本算法中如果 I 帧丢失,恢复时只采用了简单的拷贝法,因此对于如何对 I 帧进行有效的恢复也是今后研究的主题。

参考文献:

- [1] ZI F, PAPAGEORGIOU G, KRISHNAMURTHY S V, *et al.* Trading off distortion for delay for video transmissions in wireless networks [C]// INFOCOM 2013: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2013: 1878–1886.
- [2] XU Y, ZHOU Y. H. 264 video communication based refined error concealment schemes [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(4): 1135–1141.
- [3] WU Z, GAO S. An adaptive multi-level matching interpolation algorithm for spatial error concealment [C]// IETICT 2013: Proceedings of the 2013 IET International Conference on Information and Communications Technologies. London: IET, 2013: 539–543.
- [4] GAO S, TU G. Spatial error concealment based on line segmentation and adaptive edge points matching [C]// ICSP 2012: Proceedings of the 2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2012, 2: 1017–1021.
- [5] CHEN L Y, CHAN S C, SHUM H Y. A joint motion-image inpainting method for error concealment in video coding [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2006: 2241–2244.
- [6] WANG Y, GUO X, FENG Y, *et al.* A novel temporal error concealment framework in H. 264/AVC [C]// ICME 2013: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE, 2013: 1–6.
- [7] CAI C, ZHANG J X. Improved error concealment method with weighted boundary matching algorithm [C]// ICMT 2011: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Multimedia Technology. Piscataway: IEEE, 2011: 384–386.
- [8] THAIPANICH T, WU P-H, KUO C-C J. Low-complexity video error concealment for mobile applications using OBMA [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 753–761.
- [9] SULLIVAN G J, OHM J, HAN W-J, *et al.* Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1649–1668.
- [10] NIGHTINGALE J, WANG Q, GRECOS C. HEVCStream: a framework for streaming and evaluation of high efficiency video coding (HEVC) content in loss-prone networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(2): 404–412.
- [11] LIU C, MA Y, LU D, *et al.* Error concealment based foreground and background for HEVC [J]. Video Engineering, 2012, 36(15): 8–11. (刘畅, 马然, 刘德阳, 等. HEVC 中基于前后景区域的错误隐藏[J]. 电视技术, 2012, 36(15): 8–11.)
- [12] LIN T-L, YANG N-C, SYU R-H, *et al.* Error concealment algorithm for HEVC coded video using block partition decisions [C]// ICSPCC 2013: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing. Piscataway: IEEE, 2013: 1–5.
- [13] PENG Q, YANG T, ZHU C. Block-based temporal error concealment for video packet using motion vector extrapolation [C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. Piscataway: IEEE, 2002, 1: 10–14.
- [14] CHANG Y-L, REZNIK Y A, CHEN Z, *et al.* Motion compensated error concealment for HEVC based on block-merging and residual energy [C]// Proceedings of the 2013 20th International Conference on Packet Video Workshop. Piscataway: IEEE, 2013: 1–6.
- [15] ZHAO B, DELP E J. Inter-layer error concealment for scalable video coding based on motion vector averaging and slices interleaving [C] // ICME 2013: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE, 2013: 1–6.
- [16] FRANK B, DAVID F, KARSTEN S. HM software manual [EB/OL]. [2014–12–01]. https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/tags/HM-10.0/doc/software-manual.pdf.

(上接第 1743 页)

- [10] IKEDA M, KAMEDA H. Moving target detecting apparatus, moving target detecting method, and computer readable storage medium having stored therein a program causing a computer to function as the moving target detecting apparatus: United States Patent Application 12/490973 [P]. 2009–06–24.
- [11] HAN Y, ZHANG Z, HAO F, *et al.* Shadow detection based on texture features in gray sequence images [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2931–2942. (韩延祥, 张志胜, 郝飞, 等. 灰度序列图像中基于纹理特征的移动阴影检测[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2931–2942.)
- [12] MANZANERA A, RICHEFEU J C. A new motion detection algorithm based on Σ - Δ background estimation [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(3): 320–328.
- [13] SUN S, QIN Y, MA X, *et al.* ViBe foreground detection algorithm and its improvement with morphology post-processing for outdoor scene [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(10): 159–162. (孙水发, 覃音诗, 马先兵, 等. 室外视频前景检测中的形态学改进 ViBe 算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(10): 159–162.)
- [14] SU Y, LI A, JIANG K, *et al.* Improved visual background extractor model for moving objects detecting algorithm [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(2): 232–240. (苏延召, 李艾华, 姜柯, 等. 改进视觉背景提取模型的运动目标检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(2): 232–240.)
- [15] ZHANG X, XU B, DONG S. Adaptive median filtering for image processing [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2005, 17(2): 295–299. (张旭明, 徐滨士, 董世运. 用于图像处理的自适应中值滤波[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(2): 295–299.)
- [16] GUO H, XIE K. An improved method of adaptive median filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(7): 1185–1188. (郭海霞, 解凯. 一种改进的自适应中值滤波算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(7): 1185–1188.)