

文章编号: 1004-924X(2016)03-0626-09

基于自适应边缘阈值及方向加权的空间错误隐藏算法

李玉峰^{1*}, 李广泽², 龙科慧²

- (1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 辽宁 沈阳, 110136;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130033)

摘要: 针对H.264/AVC压缩视频码流在无线信道传输过程中会由于数据丢包导致图像重构质量下降的问题, 提出了一种基于自适应边缘阈值及方向加权的空间错误隐藏算法。该算法利用图像边缘检测Sobel梯度算子检测相邻宏块边缘; 根据受损宏块的相邻宏块具体信息自适应设定梯度阈值, 最后对受损宏块进行方向加权插值从而重构图像。实验表明, 该算法简单实用, 不仅保留了丢失块像素加权平均算法的优点, 而且能够用于边缘信息强度不同的错误隐藏。在不同的实时传输协议(RTP)丢包概率情况下, 该算法的峰值信噪比传统自适应算法提高了0.2~0.4 db, 较多方向插值算法提升了0.2~3.8 db, 提高了图像恢复质量, 而且具有较高的应用价值。

关键词: H.264/AVC; 错误隐藏; 自适应边缘阈值; 方向加权; Sobel梯度算子

中图分类号: TN943; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0626

Spatial error concealment algorithm based on adaptive edge thresholding and directional weight

LI Yu-feng^{1*}, LI Guang-ze², LONG Ke-hui²

- (1. College of Electronics and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: li-yu-feng@126.com

Abstract: In wireless transmission, H.264/AVC compressed video stream shows poorer image reconstruction quality due to the data losing, so this paper presents a spatial error concealment algorithm based on adaptive edge thresholds and directional weights. This algorithm uses Sobel gradient operator in image edge detection to detect the edge of adjacent macroblocks. Then it sets adaptively gradient threshold according to the specific information of adjacent macroblock in the damaged macroblock. Finally, it makes the direction weighted interpolation for the damaged macroblock implement the image reconstruction. Experiments show that the algorithm is simple and practical. It not only retains the advantages of the weighted average algorithm and conceals the errors of the images with different edge information intensities. The Peak Signal to Noise Ratio of the algorithm has improved 0.2~3.8 db as compared to that of the Multi-Directional Interpolation algorithm in different probability events of data losing for Real-time Transport Protocol(RTP). This algorithm improves the quality of image restoration and has a higher application value.

Key words: H.264/AVC; error concealment; adaptive edge threshold; direction weight; Sobel gradient operator

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61171081); 辽宁省自然科学基金资助项目(No. 2013024008);

1 引言

ITU-T的视频编码专家组(Video Coding Experts Group, VCEG)与ISO/IEC的运动图像专家组(Moving Pictures Experts Group, MPEG)经过大力研究,于2003年组成联合视频专家组(Joint Video Team, JVT)制定了新的数字视频通信标准,即H.264/AVC。该视频通信标准具有低码流、高质量、抗误码性能强以及网络适应性强等特点。但是在视频通信中,若要获得较低的冗余量与高压缩比,那么视频码流抵抗差错的能力就会变得非常脆弱^[1]。传输过程中一旦出现比特错误,则预测编码和可变长编码会使错误更快地在视频中扩散,从而使视频质量下降。根据视频图像的传输特点,学者们提出了三种方式来改善视频的抗误码能力:第一,在编码端改变编码策略或添加冗余;第二,在传输过程中,改善传输通道的质量或建立多传输通道;第三,在解码端根据图像信息对受损图像进行错误隐藏。错误隐藏算法又可以分为帧内错误隐藏^[2]和帧间错误隐藏^[3-4]。前者主要利用丢失块的正确相邻宏块来推测当前受损块的内容;后者主要利用图像序列的连续性,通过预测丢失块的运动矢量来进行错误隐藏。

在文献[5]中,P. Salama等提出了利用相邻正确宏块的边缘像素重建受损宏的空间像素加权平均算法(Weighted Averaging, WAVG)。该算法的优点是算法简单、运行时间较短,并且已经应用在H.264/AVC测试平台中^[6],在文献[7]中,Song Li等提出了基于编码的自适应像素插值的错误隐藏算法。该算法根据丢失像素到4个相邻宏块的距离、正确宏块的百分比及其与受损宏块的相似度3个因素确定受损宏块的插值。在文献[8]中,Donghyung Kim等提出了自适应仿射的错误隐藏算法。该算法基于重叠边界匹配算法自适应地进行错误隐藏,首先将一个受损宏块分为8个三角形区域,并分别对它们进行错误隐藏。文献[9]中,Mani Ranjbar等提出了一种典型的错误隐藏算法。该算法根据相邻宏块的内容应用分割方法,将图像的另一个正确宏块复制到丢失宏块位置上。上述算法虽然具有一定的恢复效果,但算法复杂,计算量较大,对于存在边缘的区域恢复效果不太理想,且容易产生边缘模糊现象。针对此问题,在文献[10]中,Jan Koloda等提出了基于边缘检测的错误隐藏算

法。该算法首先利用霍夫变换得到相邻宏块像素的边缘信息,并利用边缘效应最强的边缘进行图像重构,但是该算法容易受噪声的影响。在文献[11]中,Hadi Asheritichul等提出了基于边缘检测的多方向插值算法(Multi-Directional Interpolation, MDI)。该算法利用相邻宏块的边缘信息,对受损宏块进行多方向加权插值,但是该算法对于纹理性较弱,边缘性较强的图像,恢复效果一般。在文献[12]中,何骥鸣等提出了一种自适应错误隐藏算法。该算法对于边缘性较强的宏块有较好的恢复效果,但是该算法自适应阈值固定,不能适用于多种视频序列的错误隐藏。在文献[13]中,Masoud Mohammadzadeh Qaratlu等提出了基于方向外推的空间错误隐藏算法,首先确定出受损宏块的边缘方向,然后根据正确接收的相邻宏块重建受损宏块。在文献[14]中,Evaggelia Tsiligianni等提出了基于边界形状的错误隐藏技术,利用物体边缘特性对丢失区域进行恢复。文献[13-14]对纹理特性较复杂的图像恢复效果一般。

针对上述问题以及特点,本文提出了基于自适应边缘阈值及方向加权的空间错误隐藏算法,根据相邻宏块的具体内容自适应判断像素梯度阈值,从而对相邻宏块的边缘信息有更加准确的判断。

2 自适应边缘阈值检测方法

宏块描述信息(Block Description Information)是准确地描述图像的每一块内容计算^[15]。视频图像中,宏块存在很丰富的边缘信息,若在忽略了边缘信息的情况下进行图像恢复,则会造成图像边缘模糊,这也是导致图像重构质量下降的主要原因。本算法主要分为三个步骤:第一,用Sobel算子对受损宏块的相邻宏块进行边缘检测,并计算每个像素的梯度和方向;第二,应用自适应阈值算法对相邻宏块中每个像素的梯度和方向进行筛选,以得到有效梯度及方向;第三,根据受损宏块中每个像素的空间坐标及其最大梯度和方向,确定加权方向并进行加权插值。

2.1 边缘方向估计

H.264编解码器参考模型(Joint Model, JM)中编码端灵活宏块重排模(Flexible Macroblock Ordering, FMO)将视频图像中的宏块重新排序,并映射在不同的片组中进行编码^[16]。视频传输过程中是以片为

单位进行传输的,从而降低了相邻宏块同时丢失的可能性。解码端根据FMO模式确定每个宏块在图像中的具体位置。H.264视频信号由亮度信号与色度信号构成,由于人眼只对亮度信号敏感,所以只对亮度信号采用本文算法进行预测,色度信号则用空间像素加权平均算法进行预测。

本算法采用Sobel算子对相邻宏块中各像素做边缘梯度检测。其中 S_v 为垂直算子, S_h 为水平算子,如式(1)所示:

$$S_h = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_v = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

假设受损宏块相邻的正确接收宏块中的像素为 $p(x,y)$,则其水平和垂直梯度分别为:

$$g_h(x,y) = S_h \otimes p(x,y), \quad (2)$$

$$g_v(x,y) = S_v \otimes p(x,y), \quad (3)$$

则像素 $p(x,y)$ 的梯度和方向分别为:

$$G(x,y) = \sqrt{g_h^2(x,y) + g_v^2(x,y)}, \quad (4)$$

$$\theta(x,y) = -\arctan\left(\frac{g_v(x,y)}{g_h(x,y)}\right). \quad (5)$$

一般受损宏块周围有8个相邻宏块,其中受损宏块与其上、下、左、右相邻的宏块间的相关性较大^[17]。为了减少计算量,通常取受损宏块周围上、下、左、右相邻宏块中的8行或8列像素作为相邻宏块,同时将边缘方向分为8个方向(1~8),分别如图1,图2所示,每个像素所得 $\theta(x,y)$ 分别归类存放。

2.2 自适应边缘阈值检测方法

应用Sobel梯度算子可以计算出每个像素的梯度和方向,然而并非所有像素的梯度都对丢失宏块有意义,这是因为根据电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)的成像特点,不同像素点即使具有相同的颜色,其灰度值也不一定相同,所以它们虽然具有一定的梯度值,但不属于边缘信息。另外,图像噪声产生的梯度值也不属于边缘信息。在文献[12]中,该算法采用人为设定阈值来滤除无效边缘梯度信息,但该算法有可能不能有效滤除无效边缘信息或者会将有效边缘梯度信息滤除。与文献[12]不同,本文算法根据相邻宏块的具体内容自适应设定阈值。

首先,对于受损宏块的任一相邻宏块,设定一个最小阈值 T_m (一般取值为0.1),如果所有梯度值均小于 T_m ,则采用WAVG算法。该算法根据对相邻宏

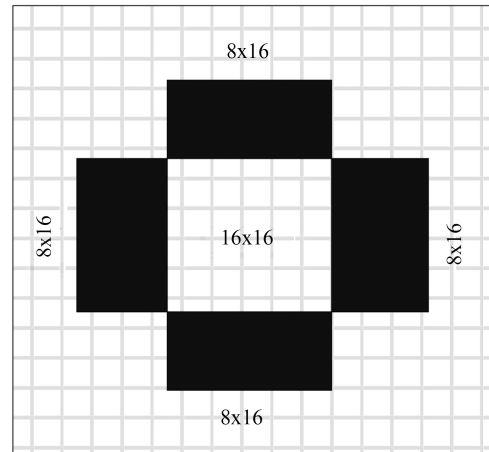


图1 相邻宏块区域选择

Fig. 1 Area selection of adjacent macroblocks

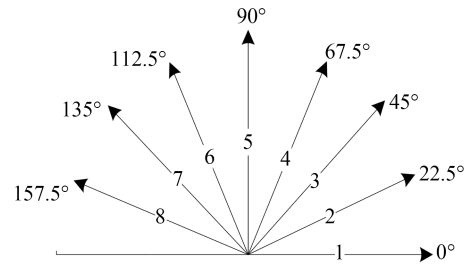


图2 边缘方向分类

Fig. 2 Edge direction classification

块中的边界像素作加权平均计算得到受损宏块中每个像素点的值。其中,权值与插值像素到参考像素的距离成反比,如式(6)所示:

$$P(x,y) = \frac{(p_1 * d_3 + p_2 * d_4 + p_3 * d_1 + p_4 * d_2)}{(d_1 + d_2 + d_3 + d_4)}, \quad (6)$$

其中: $p(x,y)$ 为丢失块中坐标为 (x,y) 的像素值, p_1, p_2, p_3, p_4 分别为受损块上左下右相邻宏块中的像素值, d_1, d_2, d_3, d_4 分别为像素点 $p(x,y)$ 到相邻宏块的距离。空间像素加权平均算法实现简单,计算量较小,当视频图像比较平滑时,空间加权像素平均算法可以获得较好的视频图像效果。当视频图像存在较多的边缘信息或纹理信息时,也就是存在像素梯度值大于最小阈值 T_m 时,如式(7)所示:

$$E_c = \{[G(x,y), \theta(x,y)] | G(x,y) > T_m\}, \quad (7)$$

然后,根据相邻宏块的内容自适应设定阈值 τ_a ,如式(8)所示。

$$\tau_a = \mu + c * \sigma, \quad (8)$$

其中: μ 与 σ 分别为正确接收相邻宏块中全部有效边

缘梯度的均值和方差。系数 c 为归一化因子, 如式(9)所示。可见, 它们也是根据受损宏块周围相邻宏块中的具体内容而定的。

$$c = 1 - \frac{1}{\log_2(n)} \sum_{\rho_i \in E_q} \left(\rho_i \log_2 \left(\frac{1}{\rho_i} \right) \right), \quad (9)$$

其中: E_q 为当前宏块的有效边缘梯度归一化, 如式(10)所示:

$$E_q = \left\{ \rho_i \left| \rho_i = G_i / \sum_{j=1}^n G_j, i = 1, 2, \dots, 8 \right. \right\}, \quad (10)$$

其中: G_i 为第 i 方向下的宏块梯度总和, G_j 为第 j 方向下的宏块梯度的总和。因此, 为了保留较多的有效边缘, c 值应该越小越好, 反之 c 值越大越好。可见, τ_a 的值是根据相邻正确接收宏块的内容自适应得到的。最后, 得出任一相邻宏块的有效边缘梯度集合 E_i , 如式(11)所示:

$$E_i = \{ [G(x, y), \theta(x, y)] \mid \in E_c \mid G(x, y) > \tau_a \}. \quad (11)$$

3 自适应像素插值方法

3.1 相关像素及加权方向的确定

相关像素, 即梯度方向经过延伸后通过丢失块的像素, 如图3所示。像素点 p_1 在其梯度方向延伸后没有经过受损宏块, 所以不能反映受损宏块的边缘信息, 而像素点 p_2 为相关像素。采用式(12)~(15)判断相关像素, 其中 R, U, L, D 分别为受损宏块右、上、左、下相邻宏块中的像素点与相应梯度方向下与受损宏块相交边界的坐标。

$$U = column - (blockSize - row) / \tan(\theta), \quad (12)$$

$$D = column + (row + 1) / \tan(\theta), \quad (13)$$

$$L = row - (blockSize - column) * \tan(\theta), \quad (14)$$

$$R = row + (column + 1) * \tan(\theta). \quad (15)$$

假设相邻宏块像素坐标为 $(row, column)$, 如果其为相关像素, 则 R, U, L, D 的取值范围为0~15。

统计某一方向下的相关像素梯度值总和 $D_n[\theta]$, 如式(16)所示:

$$D_n[\theta] = G_n[\theta(row_1, column_1)] + G_n[\theta(row_2, column_2)] + \dots + G_n[\theta(row_m, column_m)], \quad (16)$$

其中: $D_n[\theta]$ 为相邻宏块 n (上下左右共4个宏块)在 θ (1~8)方向下的所有像素的梯度总和。

3.2 受损宏块的自适应像素插值

将通过相邻宏块方向下的最大梯度总和 $D_n[\theta]$ 与受损像素到此相邻块的距离 d_n 进行加权计算,

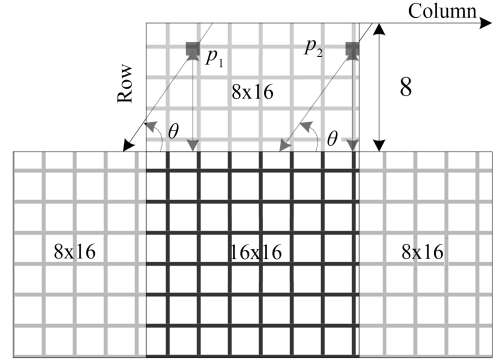


图3 相关像素示意图

Fig. 3 Schematic of related pixels

如式(18)所示, 取加权后的最大值为 $D'_n[\theta']$, 则相邻宏块的方向 θ' 为受损像素的插值方向, 如图4所示。

$$D'_n[\theta'] = D_n[\theta'] \times (blockSize - l) / blockSize, \quad (17)$$

$$pixel = (p_1 * d_2 + p_2 * d_1) / (d_1 + d_2), \quad (18)$$

其中: Pixel为受损像素, p_1 和 p_2 分别为相邻宏块的边界点, d_1 和 d_2 分别为受损像素到像素点 p_1 和 p_2 的距离。

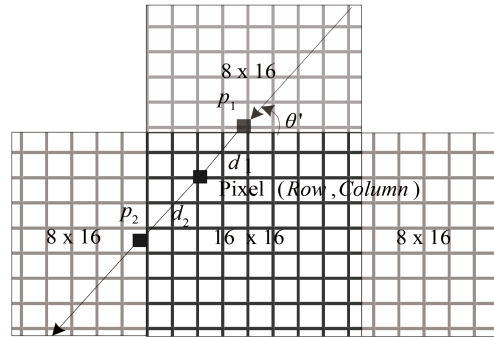


图4 方向插值示意图

Fig. 4 Diagram of direction interpolation

本文提出的基于自适应阈值及方向加权空间错误隐藏算法的流程图如图5所示。

4 实验结果

本文所提出的算法在JM86测试平台进行了仿真, 实验选取了Foreman_qcif(176 pixel × 144 pixel), CREW(704 pixel × 576 pixel), Carphone(176 pixel × 144 pixel)作为测试图片, 并且使用LostRtp模拟丢包环境。其中, Foreman_qcif图像具有像素较低, 边缘特性较强, 纹理特性较弱等特点, 如图6(a)所示。CREW图像具有像素较高, 纹理特性和

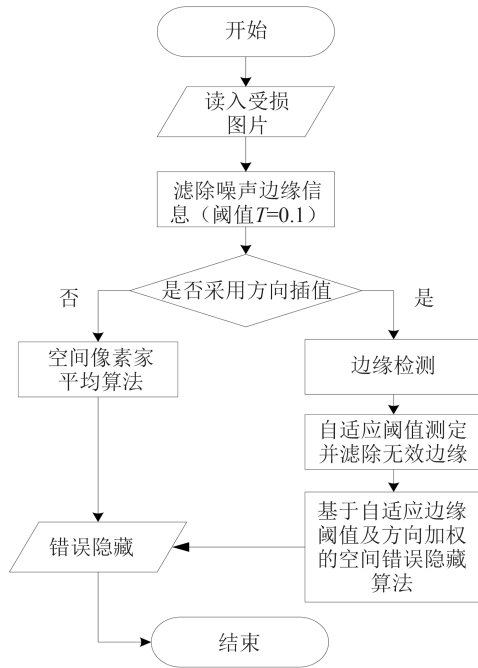


图 5 本文算法的流程图

Fig. 5 Flow chart of proposed algorithm

边缘特性都比较复杂等特点，如图7(a)所示。Carphone图像具有像素较低，纹理特性较强，边缘特性较弱等特点，如图8(a)所示。首先利用LostRtp对图像进行模拟丢包，其中丢包后未处理图像分别如图6(b)，7(b)，8(b)所示。然后，分别应用空间像素加权算法(WAVG)^[5]，传统自适应加权算法^[12]，自适应多方向加权算法(MDI)^[11]，以及本文所提出的算法对受损图像进行错误隐藏，其仿真结果分别如图6，图7，图8所示。

从图6(c)，图7(c)，8(c)可以看出，WAVG算法能够使图像中受损块得到较好的平滑，而对于具有丰富边缘信息的受损宏块，得到的图像边缘有模糊甚至出现虚假边缘现象。由图6(d)，图7(d)，8(d)可以看出，API算法对于边缘信息丰富的受损宏块有较好的恢复效果，同时明显优于WAVG算法的恢复效果。由图6(e)，图7(e)，8(e)可以看出MDI算法对受损宏块的恢复效果不如API方法，具体见图6(e)中帽子所在宏块，7(e)中拉链所在宏块，8(e)中车顶所在宏块。相比较而言，本文算法在一定程度上要优于WAVG、API以及MDI，如图



图 6 Foreman_qcif仿真结果对比

Fig. 6 Simulation results contrast of Foreman_qcif



图 7 CREW 仿真结果对比

Fig. 7 Simulation results contrast of CREW

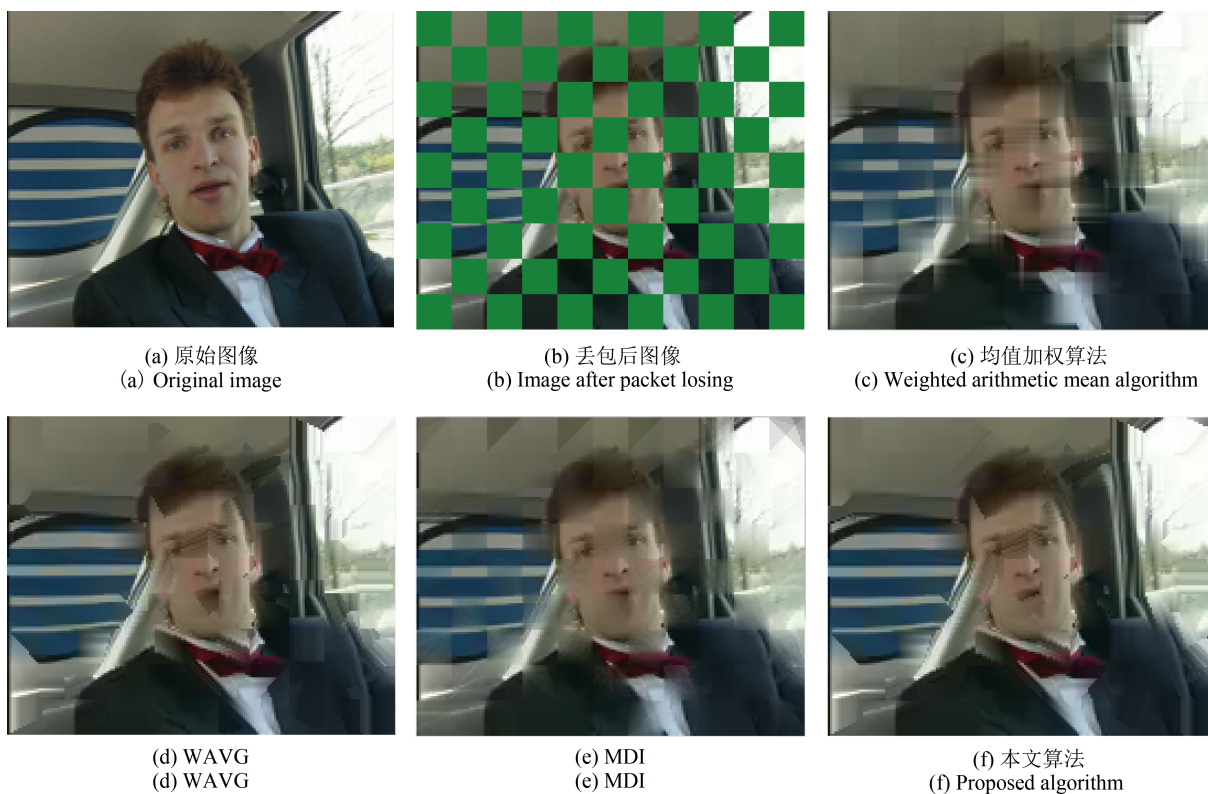


图 8 Carphone 仿真结果对比

Fig. 8 Simulation results contrast of Carphone

6(f), 图7(f), 8(f)所示。

分别对上述测试图片进行丢包, 并进行帧内错误隐藏, 所得峰值信噪比^[17](Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)数据如表1所示, 算法仿真复杂度对比如表2所示。

表 1 JM86仿真结果

Tab. 1 Simulation results of JM86

图像序列(尺寸)	信噪比(db)				
	原始错误图片	均值加权算法	自适应错误隐藏算法	MDI	本文算法
Foreman(176×144)	6.4465	23.3579	25.2124	22.8757	25.4995
	12.0235	29.5272	34.1952	30.702	34.5636
	11.7756	29.1293	33.7026	30.9857	34.0883
CarPhone(176×144)	9.8876	23.4778	23.9194	23.799	24.2014
	16.7785	27.7572	27.896	28.2697	28.4097
Crew(704×576)	15.9346	32.8466	34.9987	34.8832	35.105

表 2 算法复杂度对比

Tab. 2 Comparison of algorithm complexities

图像序列(尺寸)	时间/ms			
	均值加权算法	自适应错误隐藏算法	MDI	本文算法
Foreman(176×144)	27	32	53	32
	172	172	182	173
	171	175	180	175
CarPhone(176×144)	28	33	53	34
	172	172	171	174
Crew(704×576)	754	757	811	756

相对于自适边缘检测算法低, 而对纹理信息丰富的Carphone视频图像, 其重建的峰值信噪比相对于自适边缘检测算法高。而本文算法重建视频图像的峰值信噪比较其它3种算法均有明显提升。本文算法复杂度略高于均值加权平均算法和自适应边缘检测算法, 却低于MDI, 如图10(彩图见期刊电子版)所示。

从客观比较结果来看, 在同一图像下, 丢包率越高, 经同一算法恢复后图像的信噪比越低。对于同一图像并且丢包率相同的情况下, 利用空间像素加权平均算法对图像质量的恢复效果比较好。而自适应错误隐藏算法以及MDI是利用图像边缘特性对受损宏块进行方向加权插值的, 对于边

经过错误隐藏后的PSNR对比图, 如图9(彩图见期刊电子版)所示, 可以看出经过自适应边缘检测算法重建后的受损图像的峰值信噪较WAVG的有很大提升。多方向插值算法对边缘特性明显的Foreman_qcif和CREW视频图像重建的峰值信噪比

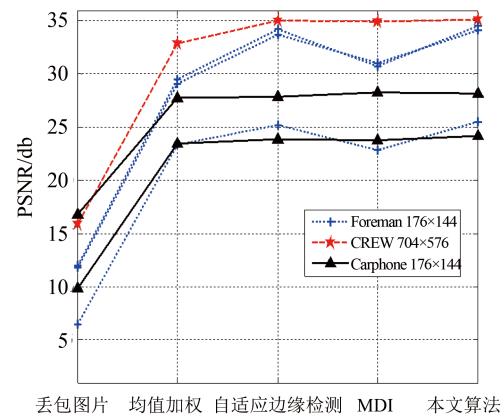


图 9 算法仿真PSNR对比图

Fig. 9 Simulation results contrast of PSNR

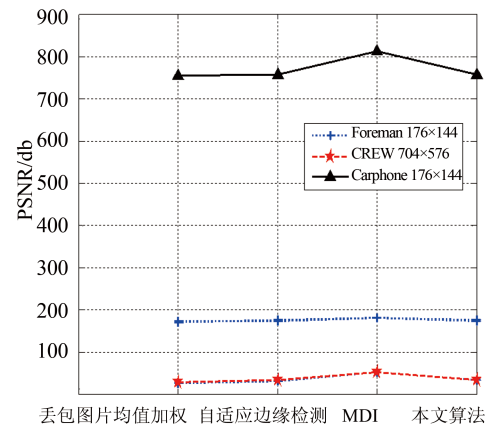


图 10 算法复杂度对比图

Fig. 10 Simulation results contrast of algorithm complexities

缘特性明显的图像重建后, PSNR值有很大的提高, 而对于纹理特性复杂的图像重建效果较差。而通过本文的错误隐藏算法恢复的图像, 其PSNR值优于传统自适应错误隐藏算法, 其图像重建后的PSNR值提升约0.2~0.4 db。所以, 对于同一图像并且丢包率相同的情况下, 空间像素加权算法对图像质量的恢复效果有比较高的提升。另外, 传统自适应错误隐藏算法以及本文错误隐藏算法恢复图像的效果要远远优于基于空间像素加权算法的恢复效果。

5 结论

本文根据图像丢失块相邻宏块的具体内容, 采用隐藏效果较好的自适应设定阈值及方向加权的

参考文献:

- [1] ZHANG Y B, XIANG X G, ZHAO D B, *et al.*. Packet video error concealment with auto regressive model [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(1): 12-27.
- [2] YAN B, GHARAVI H, HU B. Pixel interlacing based video transmission for low-complexity intra-frame error concealment [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 253-257.
- [3] ZHOU J, YAN B, GHARAVI H. Efficient motion vector interpolation for error concealment of H. 264/AVC [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 326.
- [4] XIANG Y J, FENG L M, XIE S L, *et al.*. An efficient spatio-temporal boundary matching algorithm for video error concealment [J]. *Multimedia Tools Appl.*, 2011, 52(1): 91-103.
- [5] SALAMA P, SHROFF N B, DELP E J. Error concealment in encoded video streams [J]. *Signal Recovery Technique for image and Video Compression and Transmission*, 1998: 199-233.
- [6] WANG Y K, HANNVKSELA M M, VARSA V, *et al.*. The error concealment feature in the H. 26L test model [C]. *2002 International Conference on Image Processing, Vol II*, 2002: 729-732.
- [7] SONG L, MA X. Adaptive pixel interpolation for spatial error concealment [J]. *J Sign Process Syst*, 2010, 60(S13): 291-303.
- [8] KIM D, SEO J. H.264/AVC retrieval algorithm using adaptive affine error concealment [J]. *Optical Engineering* 2010, 49(6): 067401-1-067401-10.
- [9] RANIBAR M, KASAEI S. Spatial error concealment: A novel exemplar-based approach using segmentation [J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2009, 35(4): 536-548.
- [10] KOLODA J, SANCHEZ V, PEINADO A M. Spatial error concealment based on edge visual clearness for image/video communication [J]. *Circuits Syst Signal Process*, 2013, 32(2): 815-824.
- [11] ASHERI H, RABIEE H R, POURDAMGHANI N, *et al.*. Multi-directional spatial error concealment using adaptive edge thresholding [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58(3): 880-885.
- [12] HE J M, HE S X, CHEN Z M. Improved adaptive error concealment algorithm for H. 264 intra frame [J]. *Ideo Engineering*, 2012, 36(19): 35-39.
- [13] QARATLVU M M, GHANBARI M. Intra-frame loss concealment based on directional extrapolation [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2011, 26(6): 304-309.
- [14] TSILIGIANNI E, KONDI L P, KATSAGGELOS A K. Shape error concealment based on a shape-preserving boundary approximation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(8): 3573-3584.
- [15] KIM K S, LEE H Y, LEE H K. Supplementary loss concealment technique for image transmission through data hiding [J]. *Multimedia Tools Appl.*, 2009, 44(1): 1-16.
- [16] CHAN Y L, CHEUNG H K, SIU W C. Compressed-domain techniques for error-resilient video transcoding using RPS [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(2): 357-370.

- [17] 许佳佳. 结合Harris与SIFT算子的图像快速配准算法[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 574-581.

XU J J. Fast image registration method based on Harris and SIFT algorithm [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 574-581. (in Chinese)

- [18] 王新华, 黄玮, 欧阳继红. 多探测器拼接成像系统实时图

像配准[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 211-218.

WANG X H, HUANG W, OUYANG J H. Real-time image registration of the multi-detectors mosaic imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 211-218. (in Chinese)

作者简介:



李广泽 (1976-), 男, 吉林长春人, 硕士生导师, 研究员, 主要从事空间遥感相机嵌入式控制系统应用与视频图像处理方面的研究。E-mail: Lgzandrew@tom.com



李玉峰 (1969-), 男, 吉林德惠人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为航空电子技术、图像处理与传输技术等。E-mail: li_yufeng@126.com



龙科慧 (1958-), 女, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事航天相机调焦系统的方面的研究。E-mail: long_kh@163.com