

压缩图像传输中基于小波-空间域 联合估计的差错隐藏算法

高佳 胡波

(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

摘要 基于小波域压缩的图像在传输发生错误时,会引起部分空间区域图像质量的下降。解决这一问题的传统方法是空间域插值或小波域估计。由于传统方法重构质量仍有待提高,为了获得质量更好的重构图像,提出了一种小波-空间域联合估计的差错隐藏算法。该算法首先对小波域低频系数进行简单的八邻域平均来得到初始重构图像;接着在空间域对核心受损区域进行基于块的匹配搜索,通过选择对已知正确小波系数影响最小的块作为匹配块来得到匹配图像;最后将经过滤波处理后的匹配图像变换到小波域,通过与小波域已知正确信息相融合来得到最终重构图像。仿真试验表明,在多数应用场合,该方法与简单的小波八邻域平均低频重构图像相比,客观质量峰值信噪比提高0.5~1dB左右,主观质量也有明显提高。

关键词 小波变换 等级树集合分割 差错隐藏 联合估计

中图分类号: TN941.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)11-1529-05

Hybrid Error Concealment for Compressed Image Transmission Based on Space and Wavelet Domain

GAO Jia, HU Bo

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract If error occurs when wavelet-coded images are transmitted over lossy packet networks, some part of the images will suffer from quality degradation. Traditional image reconstruction algorithms can be cataloged into space domain interpolation and wavelet domain estimation. In this paper, hybrid error concealment on both domains is presented. First, a simple reconstruction is carried out on wavelet domain by estimating the lost coefficients by its mean value of the surroundings in the low frequency subband. Second, we search for the match block of the kernel destroyed area according to the known correct wavelet coefficients. Finally, the image is re-transformed to wavelet domain after filtering, and the final reconstructed image is generated by combining both re-transformed coefficients and the original received coefficients. Experiments show that in most cases this method is better than the simple estimation by the mean value of low subband. PSNR is optimized by about 0.5 to 1 dB and the subjective image quality is also improved.

Keywords wavelet transform, set partitioning in hierarchical trees, error concealment, hybrid estimation

1 引言

基于小波域的 SPIHT (set partitioning in hierarchical trees)^[1] 图像压缩编码具有压缩效率高,算法复杂度低等优点,但在图像传输发生错误时,会

引起图像质量下降。为了减少差错传递,一个简单有效的方法是将小波系数按其天然的小波树结构进行分组编码及传输,以便使某个小组中发生的错误不会影响其他组的解码^[2]。

在丢包信道中传输打包压缩码流时,若某个包丢失,则在解码端就需对图像受损区域进行重构,由

收稿日期:2006-05-20;改回日期:2006-08-05

第一作者简介:高佳(1981~),女。2004年毕业于复旦大学电子工程系,获电子信息科学与技术学士学位,现为复旦大学在读硕士研究生。研究方向为图像压缩与可靠传输等。E-mail: gaojia_sz@163.com

于基于小波域的 SPIHT 压缩码流丢包受损区域一般具有受损区域较大,区域边界呈渐进模糊状等特点(见第 2 节),因而不利于差错隐藏的进行。

传统的差错隐藏有空间域和小波域两种。其中空间域内插方法容易引起恢复块模糊。文献[3]采用结合边缘检测的空域内插方法来恢复 16×16 的孤立丢失块,在具有明显边缘的区域得到较好的主观隐藏效果,但该算法对受损区域较大且边界不明确的情况则不完全适用。

以往的小波域差错隐藏方法大多是基于低频系数八邻域平均、高频系数置零的方法,如 Rogers 和 Cosman 提出的打包小波零树算法 PZW (wavelet zerotree image compression with packetization) 算法^[4]。文献[5]利用 2 维小波变换具有的水平和垂直方向边缘检测能力,提出了一种在高频系数指导下的低频系数恢复技术,但该算法在丢包率为 1% 的情况下,比 PZW 算法恢复的图像质量仅有 0.1 dB 左右的提高,当丢包率达 10% 时,可提高 0.7 dB,总体来说并不十分明显。

本文提出一种新的小波-空间域联合估计差错隐藏算法,该算法首先对小波域低频系数进行简单的八邻域平均得到初始恢复图像;然后将初始恢复图像的核心受损区域分为数个块,再对每个子块在其相邻区域中进行基于块匹配的搜索,进而选择对正确解码小波系数影响最小的块作为匹配块;最后将经过中值滤波、去块效应滤波等处理后的匹配图像再次变换到小波域,与小波域已知正确信息相融合,即得到最终的重构图像。试验表明,由于该算法结合了小波域和空间域两方面的信息和处理手段,因此在多数应用场合,都可以明显提高图像的重构质量。

2 小波树丢失的影响

在丢包信道传输过程中,若某棵小波树丢失,则对应于图像空间域有一类似圆形的局限区域受损。该区域的大小与所选用的小波基长度、小波变换的级数、像素量化比特数以及图像本身的内容皆有关系。例如,一幅 512×512 大小的 8bit 全白图像,进行 5 级 Daubechies $9/7^{(6)}$ 2 维小波变换后,分为 $n = 16 \times 16 = 256$ 棵小波树进行后编码,当一棵小波树丢失时,则受影响区域(像素值四舍五入后与原值不等)大小就为原图像的 $5.13 \times 1/n$

如图 1 所示,左边类似圆形的区域为上述条件

下丢失一棵小波树后的效果,其中受影响像素有 5 253 个;右边正方形区域为理想的原图的 $1/n$,像素数 $32 \times 32 = 1 024$ 个。在本文中,定义图 1(a)为实际受损区域,图 1(b)为核心受损区域。通常实际受损区域边界逐渐地与周围正确像素相连接,其确切边界与多个因素有关,不可预知。

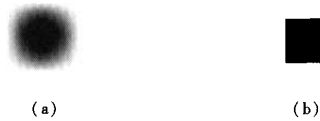


图 1 丢失一棵树时的影响

Fig. 1 The impact of a lost tree

此外,为了提高图像压缩效率,一般会对图像做多级小波变换,以便使得到的低频子带具有较小的空间尺寸,由于其对应的小波树棵数较少,因此,当一棵小波树丢失时,其空间域图像受损区域较大。

如上所述,由于小波树丢失造成的受损区域一般具有受损区域大和区域边界不明确的特点,从而给估计造成了困难。

3 小波-空间域联合估计

3.1 算法流程

本文提出的小波-空间域联合估计差错隐藏算法主要分为 4 步(见图 2)。

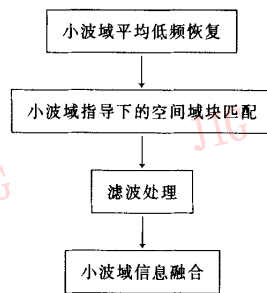


图 2 算法流程

Fig. 2 Flow chart

3.2 小波域平均低频恢复

若某小波树在传输过程中丢失,则本文首先进行 PZW 算法中小波域的简单估计。由于小波域低频子带具有高度的相关性,因此丢失系数可以通过其相邻系数的均值来估计;而高频系数一般较小,且

人眼对于图像高频信息相对不敏感,因此在简单估计中可以直接置零,即得到了初始重构图像。

3.3 小波域指导下的空间域块匹配

从第 2 节可以看到,由于小波变换滤波器的卷积作用,若对初始重构图像受损区域进行某空间域的处理,则对应到小波域会同时影响到其相邻区域正确小波系数的取值。很明显,在对受损区域的空间域处理时,若能使受损值无限接近于无损值,则该处理对已知正确小波系数的影响就趋向于零,反之就对正确系数有比较大的影响。

本文将核心受损区域分为数个小子块,在每个小子块的相应搜索范围内进行搜索,选取对已知小波系数影响最小的匹配块。对应于图像内容以及解码端计算能力的不同,可取不同的搜索区域大小。例如,在本文仿真中,核心受损区域大小为 32×32 ,可将其分为 4 个相同大小的子块,子块搜索区域如图 3 所示,搜索区域 5 倍于子块面积。

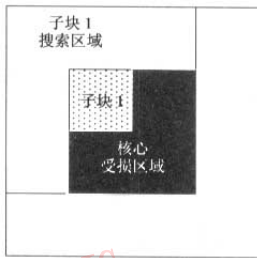


图 3 块匹配

Fig.3 Block matching

设初始重构图像的小波系数为 $W_0(x, y)$ (下角 0 代表 origin), 已知正确小波系数的坐标集合为 C_R (下角 R 代表 correct), 丢失小波树的坐标集合为 C_I 。若对于核心受损区域的某小子块, 取中心为 (x_0, y_0) 的搜索块作为匹配块, 则得到的相应小波变换系数为 $W_{match}(x, y, x_0, y_0)$ 。先定义代价函数 E 为 $E(x_0, y_0) = \sum_{(x, y) \in C_R} (W_0(x, y) - W_{match}(x, y, x_0, y_0))^2$ 然后在设定搜索范围中, 寻找使 E 最小的 (x_0, y_0) 作为当前子块的匹配块。

如果仅从空间域连续条件出发进行块匹配, 则受损区域边界不明确是一个不可避免的问题。本文提出的在正确小波系数指导下的空间域块匹配可找到小波域意义上的最接近块作为损失区域的估计。

由于图像的受损块总是和邻近区域有一定的相似性, 至少在图像平均灰度等方面很少有突变, 因此这种匹配经过后续处理就可以在很多时候优化初始重构图像。

3.4 滤波处理

3.4.1 去块效应滤波

由于本文将一个较大的核心受损区域分为数个小子块, 且各个小子块寻找各自相应的匹配块, 因此, 匹配后的图像在受损区域一般可以明显看到不连续的块效应。

针对这一问题, 本文采用 H. 264 编码环中的去块效应滤波器^[7]。在该系统中, 块边缘强度较大时的强滤波适用于本文情况。如图 4 所示, 对应于垂直边界:

$$p_0^{new} = (p_2 + 2 \times p_1 + 2 \times p_0 + 2 \times q_0 + q_1 + 4) / 8$$

$$p_1^{new} = (p_3 + 2 \times p_2 + 2 \times p_1 + 2 \times p_0 + q_0 + 4) / 8$$

$$p_2^{new} = (2 \times p_3 + 3 \times p_2 + p_1 + p_0 + q_0 + 4) / 8$$

q 侧的滤波类似于 p 侧, 且水平边界的滤波与垂直边界完全对应。

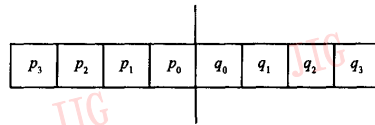


图 4 去块效应

Fig.4 Deblocking

3.4.2 中值滤波

除了子块之间的块效应外, 核心受损区域到实际受损区域的过渡带中还有明显的不连续性。针对此问题, 本文在正方形核心受损区域的 4 条边界上采用中值滤波进行处理。经过处理, 该过渡带变得模糊, 由于去除了边界上人为加入的高频突变, 并保留了过渡带中新估计的低频成分, 从而使得下一步小波域的信息融合更为有效。

3.5 小波域信息融合

如上文所述, 以上各步处理对于已知正确小波系数都是有影响的。经过之前的处理, 丢失小波树的估计已经进一步提高。因此最后应将正确小波系数与丢失小波树估计两者结合起来。

若初始重构图像的小波系数为 $W_0(x, y)$, 经过匹配和滤波后的图像小波系数为 $W_{new}(x, y)$, 已知正确系数的坐标集合为 C_R , 丢失小波树的坐标集合为 C_I 。最终重构图像的小波系数为

$$W_{final}(x,y) = \begin{cases} W_o(x,y) & (x,y) \in C_R \\ W_{new}(x,y) & (x,y) \in C_L \end{cases}$$

将小波系数 $W_{final}(x,y)$ 反变换到空间域即可得最终重构图像。

4 实验结果与结论

为了验证本文算法的效果,本文对 512×512 的 Lena 8bit 灰度图像进行了仿真。实验时,首先对原图进行 5 级 Daubechies 9/7 2 维小波变换,其得到的低频子带为 16×16 ;然后将低频子带中每一个节点作为一棵小波树的根结点来得到独立编码和传输的子树 256 棵。对于各棵子树进行 SPIHT 编码和传输。图像压缩比为 20。在正确传输的情况下,解码端得到的图像峰值信噪比 $PSNR = 35.6397\text{dB}$ 。

当某一棵小波树丢失时,核心受损区域大小为 32×32 。按照第 3 节所述差错隐藏方案进行估计。图 5 显示从 Lena 图像截取的 n 个受损部分实验例子的位置。

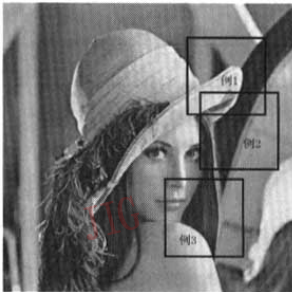
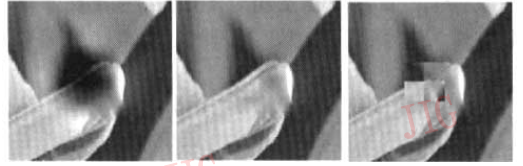


图 5 各例在原图中所处位置
Fig.5 Image positions of the following examples

图 6 ~ 图 8 是 Lena 图像受损部分的截图用各种方法处理后的结果图像。各图中的图 (a) 为受损图像;图 (b) 为初始重构图像;图 (c) 为块匹配图像;图 (d) 为去块效应滤波后图像;图 (e) 为中值滤波后图像;图 (f) 为最终重构图像。

图 6 ~ 图 8 中初始重构图像即为用 PZW 算法中的低频系数平均,高频系数置零的估计方法重构的图像。由例 1 中可以看到,经过本文的算法处理重构,其受损部分的平均灰度更接近于真实值。例 2 中,最终重构图像已经非常接近于正确传输的图像。该例通过匹配块,已非常好地修补了受损区域中的一条主要边缘。例 3 中,图 8(f) 中受损区域的



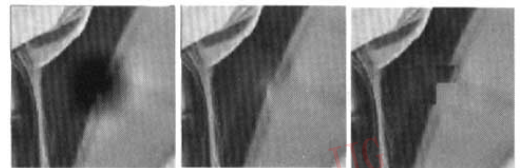
(a) 受损图像 (b) 初始重构图像 (c) 块匹配图像



(d) 去块效应滤波 (e) 中值滤波后图像 (f) 最终重构图像后图像

图 6 例 1

Fig.6 Example1



(a) 受损图像 (b) 初始重构图像 (c) 块匹配图像



(d) 去块效应滤波 (e) 中值滤波后图像 (f) 最终重构图像后图像

图 7 例 2

Fig.7 Example2

左边与上边的模糊过渡地带已比图 8(b) 提高很多,这主要是由左上子块的良好匹配所带来的。

各例中初始重构图像与最终重构图像质量对比见表 1,由表 1 可见,最终重构图像质量较初始重构图像峰值信噪比提高 $0.7\text{dB} \sim 1.1\text{dB}$ 。

综上所述,本文提出的一种小波-空间域联合估计的差错隐藏方法,融合了两域的信息和处理手段,并以小波域已知正确信息为指导来进行空间域的块匹配,最终通过两者信息的融合来重构图像。实验证明,该算法可较好地提高图像重构的质量。

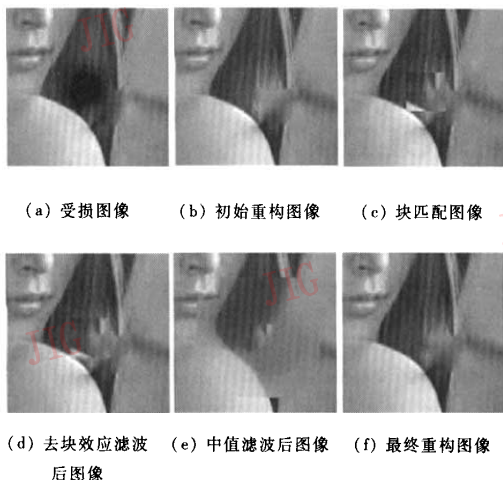


图 8 例 3
Fig. 8 Example3

表 1 初始重构图像和最终重构图像质量对比

Tab. 1 The simple reconstructed image and the final one

	初始重构图像 PSNR(dB)	最终重构图像 PSNR(dB)	提高 (dB)
例 1	33.7548	34.8221	1.1
例 2	34.7697	35.4683	0.7
例 3	32.6746	33.7041	1.0

参考文献 (References)

- 1 Said A, Pearlman W A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243 ~ 249.
- 2 Creusere C D. A new method of robust image compression based on the embedded zerotree wavelet algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 6(10): 1436 ~ 1442.
- 3 Ma Yu-feng, Cai An-ni, Sun Jin-ao. A new Error concealment method based on edge detection [J]. Measurement & Control Technology, 2005, 24(5):9 ~ 13. [马宇峰,蔡安妮,孙景鳌. 一种新的基于边缘检测的错误隐藏算法[J]. 测控技术, 2005, 24(5):9 ~ 13.]
- 4 Rogers J K, Cosman P C. Wavelet zerotree image compression with packetization [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1998, 5(5): 105 ~ 107.
- 5 Ma Guo-qiang, Guo Bao-long, Feng Zong-zhe. An approach of wavelet domain interpolation for image reconstruction in transmission [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4):552 ~ 555. [马国强,郭宝龙,冯宗哲. 传输图像的子波域插值恢复算法[J]. 电子学报, 2002, 30(4):552 ~ 555.]
- 6 Villasenor J D, Belzer B, Liao J. Wavelet filter evaluation for image compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(8): 1053 ~ 1060.
- 7 Lu Liang, Lou Jian, Yu Lu. Deblocking filter system in H.264 coding loop [J]. TV Engineering, 2003, (7):12 ~ 15. [陆亮,楼剑,虞露. H.264 编码环中的去块效应滤波系统[J]. 电视技术, 2003, (7):12 ~ 15.]