

# 一种新的低复杂度基于变换域的 图像差错掩盖算法

王勤哲 胡波 裘荟荟

(复旦大学电子工程系, 上海, 200433)

**摘要** 针对图像视频在分组交换传输中的分组丢失问题, 提出了一种低复杂度的、基于变换域的图像差错掩盖算法. 在编码器端, 采用分级编码技术, 根据其其对图像质量影响的大小将数据分成具有不同传输优先级的两组; 在解码器端, 根据丢失图像块的性质, 以及预测方法得到的阈值对其进行有效的差错掩盖. 模拟结果显示, 本算法有着更好的视觉质量以及更低的计算复杂度.

**关键词** 图像复原, 差错掩盖, 分级编码.

## A NOVEL ALGORITHM OF IMAGE ERROR CONCEALMENT ON DCT DOMAIN WITH LOW COMPLEXITY

WANG Qin-Zhe HU Bo QIU Hui-Hui

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

**Abstract** To solve the problem that image and video packets are liable to be lost when transmitted in packet switch network, a novel algorithm of image error concealment on DCT domain with low complexity was proposed. By using scalability coding technology, the coded image data were partitioned into two groups with different priorities according to their effects on the image quality in the encoder. When decoding, based on its attributes and the pre-determined threshold, the lost image block was concealed. Simulation results show that by using the proposed algorithm, better image quality and quite lower computing complexity can be obtained.

**Key words** image recovery, error concealment, scalability coding.

### 引言

基于分组交换网络(Internet、ATM 等)的多媒体传输业务,特别是图像、视频的传输业务正在迅猛发展,在分组交换网络的传输过程中存在着带宽、延迟、差错特性不断变化等问题,这些问题很容易导致分组的丢失.无论是对于图像还是视频传输,分组丢失对重建图像质量的影响都将是严重的.

对于易发生数据丢失的信道来说,必须提供一种高质量的差错掩盖机制.针对这一问题,人们提出了一些差错掩盖的算法,如最大光滑度算法<sup>[1]</sup>、神经网络预测算法<sup>[2]</sup>、基于轮廓算法<sup>[5]</sup>、遗传算法<sup>[6]</sup>等.但是最大光滑度算法、基于轮廓算法、遗传算法的计算都太复杂,无法满足图像、视频处理的实时性要求.而神经网络预测算法虽然取得了令人比较满意的结果,但是只能对纹理比较简单的图像有效,缺

少广泛的适用性.

本文结合已有的差错掩盖技术,引入变换域的分级编码和相同纹理预测的新想法,提出一种低复杂度的图像差错掩盖算法,不仅实现了有效的差错掩盖,而且大大降低了运算复杂度.

### 1 低复杂度的图像差错掩盖算法

新提出的差错掩盖算法为易发生数据丢失的信道提供了一个高质量、低复杂度的差错掩盖机制,整个算法的系统结构如图 1 所示.算法主要包含 4 个部分:(1) 变换域的分级编码,(2) 交织技术,(3) 最大光滑度算法,(4) 相同纹理预测算法.

#### 1.1 变换域的分级编码

分组交换传输中,当路由器无法消除拥塞时,将丢弃部分分组,问题在于采取什么样的丢弃策略才能使信息丢失所产生的负面影响最小.一种比较明

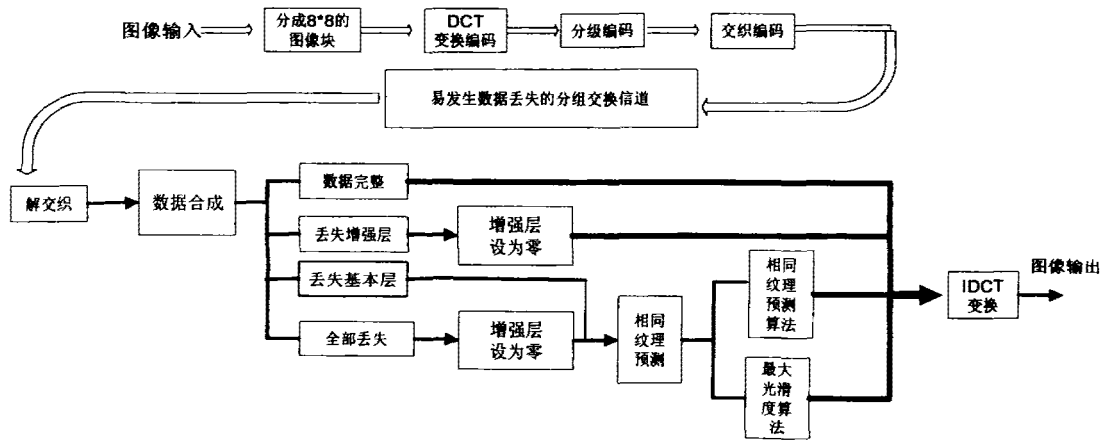


图 1 低复杂度的图像差错掩盖算法流程图  
Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm

智的做法就是在分组上标记优先级,当路由器发现拥塞时,及早丢弃优先级比较低的分组以保证优先级较高的分组正确传输。

本文的算法在 DCT 变换域上进行分级编码。DCT 系数的低频部分代表了图像的背景和轮廓,是保证图像传输业务质量(QOS)的重要信息,而 DCT 系数的高频部分是反映图像细节的较次要的信息。在分级编码过程中,用一个优先级分割点来确定哪些数据放在基本层(即高优先级层),而剩下的数据放在增强层(即低优先级层),这里,DCT 系数矩阵的左上角的  $L$  个数据,分配较高的优先级,而为其它系数分配比较低的优先级。 $L$  即为优先级分割点。

$L$  的大小由两方面因素决定:(1) 基本层的图像质量,即增强层丢失且无法恢复时的质量, $L$  越大,基本层的质量越好;(2) 基本层的丢失率,丢失率越高,图像越难恢复。根据统计,图像的 DCT 变换

编码后经过量化会有 50% 的 DCT 系数为 0,就是说只有 50% 的 DCT 系数需要传输。在此基础上,得到如图 2 所示的优先级分割点  $L$  对两个优先级数据的丢失率的影响。产生这样的结果是因为:当路由器发现拥塞时,及早丢弃优先级比较低的分组以保证优先级较高的分组的正确传输,但是当路由器不得不丢弃超过低优先级分组总数的分组时,就要丢弃高优先级的分组。由图 2 可知, $L$  越大,基本层的丢失率越高。

而  $L$  的选择必须在所提的两方面因素之间寻找一个折衷,通过实验模拟发现  $L = 15$  是比较合适的选择。

### 1.2 交织技术

这里提出的差错掩盖算法是利用每个有损块的周围相邻的无损块来估计有损块以达到差错掩盖的目的。但通常在分组交换网中数据分组的丢失是由于突发的高数据量导致网络拥塞,以至于路由器无法消除拥塞时丢弃部分分组而造成分组的经常丢失,这样,分组的丢失通常是突发的,连续的。因此就不可避免地造成连续传输的几个图像数据块无法正确恢复,在这种情况下是无法使用前面的最大光滑度算法以及相同纹理预测算法来解决,这个问题相当于通信中的突发噪声问题,因此可以利用交织技术来克服。

如果高数据量的突发是随机的,使用普通的交织技术就可以了,如果高数据量的突发是有规律的,需要引入线性同余交织技术。

### 1.3 最大光滑度算法(Maximal Smoothing)

大多数的图像、视频编码都是基于块操作的。在接收到的图像中有无损块和有损块,无损块就是

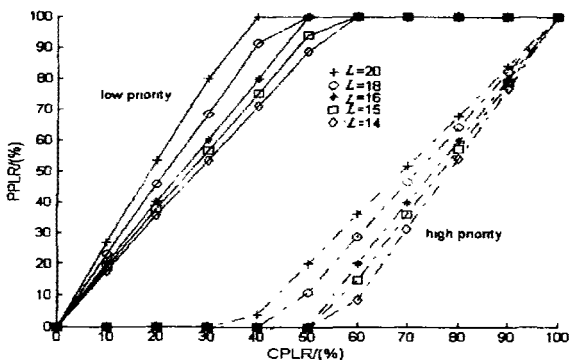


图 2 不同信道分组丢失率(CPLR)下两个优先级的分组丢失率(PPLR)

Fig.2 Packet lost rate for two priorities(PPLR) under different channel packet lost rate(CPLR)

指该块所有的 DCT 系数都能正确获得,有损失块则是指块中某些 DCT 系数是无法正确得到的.最大光滑度算法就是在最大光滑度准则下由相邻的块以及有损失块可以得到的数据来预测丢失的数据,从而重构出具有良好质量的图像.

首先假设  $f_{i,j}$  代表一个  $N \times N$  的图像块的像素矩阵的第  $i$  行  $j$  列的像素值,  $a_k$  为 DCT 系数,再假设  $R$  和  $L$  分别是正确接收和丢失的系数的下标集合.  $\tilde{a}_k$  为量化后的 DCT 系数.所要解决的问题就是怎样得到丢失的 DCT 系数  $\tilde{a}_k (k \in L)$  的估计值  $\hat{a}_k$ , 并进行如式(1)所示的 DCT 反变换重构图像:

$$\hat{f}_{i,j}(\hat{a}_k, k \in L) = \sum_{k \in R} t_{i,j,k} \tilde{a}_k + \sum_{k \in L} t_{i,j,k} \hat{a}_k. \quad (1)$$

式中  $i, j \in (0, N-1)$ . 光滑度的代价函数为

$$\Psi(\hat{a}_k, k \in L) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [\omega_{i,j}^t (\hat{f}_{i,j} - \hat{f}_{i,j-1})^2 + \omega_{i,j}^b (\hat{f}_{i,j} - \hat{f}_{i,j+1})^2 + \omega_{i,j}^l (\hat{f}_{i,j} - \hat{f}_{i-1,j})^2 + \omega_{i,j}^r (\hat{f}_{i,j} - \hat{f}_{i+1,j})^2]. \quad (2)$$

式(2)中  $\omega_{i,j}^t, \omega_{i,j}^b, \omega_{i,j}^l, \omega_{i,j}^r$  分别代表像素与其上、下、左、右 4 个方向上的相邻像素之间的约束关系.按照图 3 中箭头的指示,可以取值“0”或“1”,彼此之间有箭头表示有约束关系,相应的取值为“1”,否则取值“0”.

为了便于说明,将上面的表达转换为矩阵的方式.满足最大光滑度准则就是要求

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \hat{a}_{opt}} = T_l^T S_l \hat{a}_{opt} + T_r^T [S_r \hat{a}_r - \bar{b}] = 0, \quad (3)$$

其中,  $S = S_t^T S_t + S_b^T S_b + S_l^T S_l + S_r^T S_r$ ,  $\bar{b} = S_t^T \bar{b}_t + S_b^T \bar{b}_b + S_l^T \bar{b}_l + S_r^T \bar{b}_r$ ,  $S_t, S_b, S_l, S_r$  分别是由  $\omega_{i,j}^t, \omega_{i,j}^b, \omega_{i,j}^l, \omega_{i,j}^r$  组成的矩阵,  $\bar{b}_t, \bar{b}_b, \bar{b}_l, \bar{b}_r$  表示块边缘处的相邻像素值的矢量,  $\hat{a}_r$  代表正确接收的 DCT 系数子向量,  $\hat{a}_l$  代表包含了丢失的 DCT 系数的估计值的子向量,  $T_r$  和  $T_l$  分别代表对应于  $\hat{a}_r$  和  $\hat{a}_l$  的

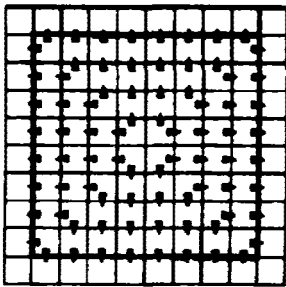


图 3 最大光滑度算法像素之间的约束关系图  
Fig. 3 Restriction relations between pixels in maximal smoothing algorithm

子变换矩阵.经过推导最后可得

$$\hat{a}_{opt} = (T_l^T S_l T_l)^{-1} T_l^T (\bar{b} - S_r \hat{a}_r). \quad (4)$$

值得注意的是,这个算法对于丢失低频的 DCT 系数的情况下有比较好的效果,而对于丢失高频时,通常将高频的 DCT 系数设为零.

### 1.4 相同纹理预测算法

我们可以看到,前面介绍的最大光滑度的差错掩盖算法中有大量的矩阵运算,而对于视频等多媒体来说,实时要求使我们在质量不损失的前提下追求计算量尽可能小.在现今的图像、视频传输中有大部分的图像中包含了大量的纹理相近的块,如背景等,如果在图像的差错掩盖时能够提前预测这些块,就不必进行差错掩盖算法了.基于这种想法我们提出了一种预测的方法,可以用很小的计算量来预测纹理相近的块,

$$\text{error} = \min(|\text{DC}_{\text{top}} - \text{DC}_{\text{bottom}}|, |\text{DC}_{\text{left}} - \text{DC}_{\text{right}}|). \quad (5)$$

式(5)中 DC 是 DCT 系数中的 DC 系数,而 DCT 代表所有的 DCT 系数.如果 error 小于某个事先设定的阈值,就不再进行最大光滑度算法,而是直接用式(6)近似估计丢失块的 DCT 系数.这样做的意义是,只要有损块的上下两块或左右两块的 DCT 系数中的 DC 系数相同,那么我们就认为这两块是具有一样的纹理,有损块和他们也有着相同的纹理结构.可以用这两块的 DCT 系数的平均值来预测有损块的 DCT 系数,即

$$\begin{cases} \text{DCT}_{\text{lost}} = \frac{\text{DCT}_{\text{top}} + \text{DCT}_{\text{bottom}}}{2}, & \text{if } |\text{DC}_{\text{top}} - \text{DC}_{\text{bottom}}| < |\text{DC}_{\text{left}} - \text{DC}_{\text{right}}| \\ \text{DCT}_{\text{lost}} = \frac{\text{DCT}_{\text{left}} + \text{DCT}_{\text{right}}}{2}, & \text{if } |\text{DC}_{\text{left}} - \text{DC}_{\text{right}}| < |\text{DC}_{\text{top}} - \text{DC}_{\text{bottom}}| \end{cases} \quad (6)$$

## 2 算法的计算复杂度

最大光滑度的差错掩盖算法中有大量的矩阵运算,而对于视频等多媒体来说,实时要求就使得我们在质量不损失的前提下追求计算量尽可能小的算法.在新提出的算法中由于分级编码技术和相同纹理预测算法的应用使得新提出的差错掩盖算法的计算复杂度大大降低,首先,从图 1 可以看出,只有丢失了基本层的数据时才会应用最大光滑度算法来进行差错掩盖,分级编码的应用使得基本层的数据的丢失率大大降低,从而避免了最大光滑度算法的大计算量.其次,在现今的图像、视频传输中有大部分

的图像中包含了大量的纹理相近的块,如背景等.相同纹理预测算法就是提前预测出与相邻块有相同纹理的有损块,不必对其进行最大光滑度掩盖算法,而只需对其相邻块求平均来进行差错掩盖.

假设一幅图像中共有  $N$  个块,最大光滑度算法的计算量为  $P$ ,相同纹理预测算法的计算量为  $Q$  (其中  $Q \ll P$ ),信道的分组丢失率为  $lost$ ,基本层的丢失率为  $lost1$ ,  $lost$  和  $lost1$  的关系如图 2 所示 ( $lost1 < lost$ ),而  $k$  个有损块可以由相邻块求平均来差错掩盖 ( $k > 0$ ),那么使用新算法前后的计算复杂度分别为

$$Complex_{old} = P \times N \times lost, \tag{7}$$

$$Complex_{new} = Q \times (N \times lost1 - k). \tag{8}$$

显然,在  $Q \ll P, lost1 < lost, k > 0$  的条件下,  $Complex_{new} \ll Complex_{old}$ ,因此,新提出的算法大大地降低了差错掩盖的计算复杂度.

### 3 实验仿真

考察一种差错掩盖算法的主要性能指标有两个方面:一是差错掩盖后的图像质量,二是算法的计算复杂度的情况.下文我们结合本算法的这两个方面



(CPLR=70% PSNR = 26.6527 db)

图 4 Maximal Smoothing 算法差错掩盖后的 Lena 图像

Fig.4 Lenaimage after Maximal Smoothing concealment



(CPLR=70% PSNR =33.3062 db)

图 5 本文的算法差错掩盖后的 Lena 图像

Fig.5 Lenaimage after the proposed algorithm concealment

的实验模拟结果来讨论该算法的性能.

首先考察差错掩盖后的图像质量,图像质量的评价分为图像质量的主观评价和客观评价.图 4 和 5 显示了在信道分组丢失率为 70%的情况下经过 Maximal Smoothing 算法和新提出的算法的差错掩盖后的 Lena 图像,可以看出,使用本文算法差错掩盖后图像的质量要比用 Maximal Smoothing 有明显的改善.图像的客观质量这里采用 PSNR 来衡量,图 6 表明,使用本文提出的算法,差错掩盖后图像的 PSNR 在信道分组丢失率(CPLR)小于 60%时,要比用 Maximal Smoothing 有大约 12db 的改进,在分组丢失率大于 60%时比用 Maximal Smoothing 方法也有明显的改进.

再来考察差错掩盖算法的计算复杂度的性能,图 7 显示的是算法应用于 Lena 图像时的计算时间 ( $t$ )曲线,从中可以看到使用本文的算法的计算复杂度大大地低于 Maximal Smoothing 算法,这一方面来自分级编码技术的应用,另一方面是因为相同纹理预测算法的应用.

### 4 结论

本文提出了一种低复杂度的基于变换域的图像

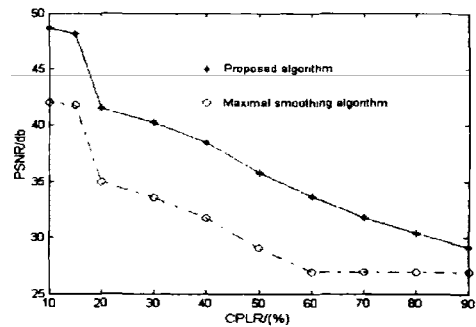


图 6 差错掩盖后图像的 PSNR

Fig.6 PSNR after error concealment

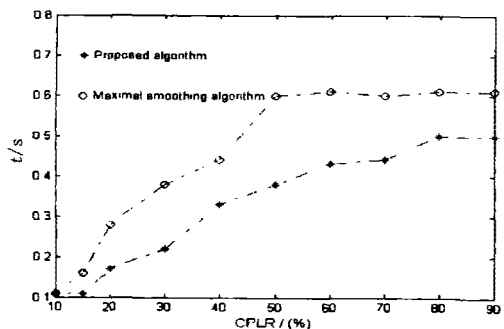


图 7 算法的计算时间 ( $t$ ) 曲线

Fig.7 Computing time ( $t$ ) curve for the algorithms

差错掩盖算法. 计算机模拟结果显示, 本文提出的算法与传统的最大光滑度算法相比, 差错掩盖后的图像有着更好的主观、客观图像质量, 同时算法计算复杂度也大大地降低, 对改善图像、视频的传输有着很重要的意义.

#### REFERENCES

- [1] Wang Y, Zhu Q-F, Shaw L. Maximally smooth image recovery in transform coding. *IEEE Trans. Commun.*, 1993, **41**(10):1544—1551
- [2] De Natale, F G B, Perra C, *et al.* DCT information recovery of erroneous image blocks by a neural predictor. *IEEE J. Select. Areas. commun.*, 2000, **18**(6):1111—1121
- [3] Ridge J, Ware F W, Gibson J D. Permuted smoothed descriptions and refinement coding for images. *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, 2000, **18**(6):915—926
- [4] LIU Jian-Feng, QI Fei-Hu. A wavelet transform approach to image edge extraction and denoising. *J. Infrared Millim. Waves* (刘建峰, 戚飞虎. 一种基于子波变换的图像边缘提取及去噪方法. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(5):351—356
- [5] Atzori L, De Natale, F G B. Error concealment in video transmission over packet networks by a sketch-based approach. *Signal Processing: Image Communication*, 1999, **15**(1-2):57—76
- [6] Shyu H-C, Leou J-J. Detection and concealment of transmission errors in MPEG-2 Images-A genetic algorithm approach. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 1997, **9**(6):937—948