

图像传输丢失信息的重建技术¹

丛 键 李在铭

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘 要 该文对于由网络传输错误导致的图像数据丢失,提出了对丢失图像信息的最优估计模型。同时针对变换编码图像数据丢失提出了一种基于变换域利用相邻子块的边界信息估计受损子块信息的技术,以及对丢失信息最优估计的实现算法与信噪比增益的解析形式。实验结果表明,重建图像信噪比可提高 10-20dB,主观质量从 1 级可改善达到 3-4 级,同现有的其他方案相比,低频与高频信息的恢复效果都有改善,同时算法简单,易于实现。

关键词 边界条件,变换编码,图像恢复

中图分类号 TN919.8

1 引 言

离散余弦变换 (DCT) 编码作为一种效率很高的图像压缩技术,被多个有关静止图像与视频信号编码的国际标准所采用,如 JPEG、H.261、MPEG-1 及 MPEG-2。以上几个国际标准的建立使得变换编码成为最重要的图像压缩方法之一。图像或视频信号的压缩编码是其能广泛应用于网络传输的重要条件,但作为图像传输载体的分组交换网或 ATM 网,当网络发生拥塞等情况时,发生分组 (Packet) 或信元 (Cell) 丢失的情况是无法避免的,同时网络应用层以下的各种纠错方案对于突发性的连续比特误码也缺乏有效的解决手段。正处于发展中的无线网络其一个显著的特点就是信道质量较差并且受外界环境的影响起伏较大。而压缩后的图像由于去除了图像信号中的冗余信息,使其对误差的敏感度大大提高,因此对由于网络传输错误或存储媒质错误导致压缩图像中一定数量变换系数丢失的情况,如何有效地恢复图像在许多实际应用环境下有重要的意义。

为了减少网络传输错误对重建图像质量的影响,一种方案是采用分层 (Layered) 传输,对于直流系数与一些低频系数通过高优先级的链路传输,较高频率的系数则使用低优先级的链路并在网络发生拥塞时可以丢弃^[1]。目前许多基于网络的图像传输系统采用了这种机制,但当高优先级的系数丢失时,将对重建图像的质量造成严重的影响。基于 LOT (Lapped Orthogonal Transform) 的图像恢复技术也有报道^[2,3],但这些算法的一个缺陷是对于直流 (DC) 系数丢失的情况很难以处理。而文献中的图像恢复方案对于 DC 系数及低频系数丢失时有很好的恢复效果,但当所有变换系数丢失时,对受损高频信息的恢复效果不理想。

本文提出了一种利用受损图像子块相邻边界上的图像信息重建受损图像内容的算法,该算法以保证相邻子块边界上图像信号的平滑性为约束条件,即使当子块的 DCT 系数全部丢失时,仍能在一遍运算后就恢复出丢失 DCT 系数在满足边界条件意义下的最优估计,并且对高频信息的恢复有很好的效果。第 2 节中将提出图像传输中信息丢失后图像重建的一般模型;在第 3 节给出对丢失的图像信息,基于边界信息的最优估计;第 4 节的内容是实验模拟结果。

2 压缩图像传输丢失信息的重建模型

由于自然图像中亮度的变化并不是非常迅速的,而是存在一个过渡带,因此当图像中某一区域内的信息在传输中或由于其他原因丢失时,我们可以假设图像中受损区域与正常区域之间邻近边界的像素亮度变化是足够平滑的。这一设想已经成功地用于解决表面重建

¹ 1999-05-09 收到, 1999-11-18 定稿

(Surface Reconstruction) 问题, 同时本文中所提出恢复受损图像区域的算法也正是基于这一假设, 相应对丢失图像信息的重建模型可如图 1 所示。

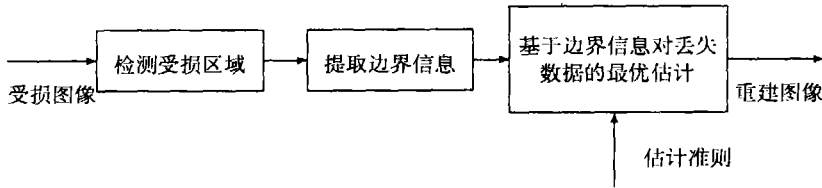


图 1 传输图像丢失数据的最优估计模型

若 f 是定义在区域 S 上的图像信号, 而 C 为闭合单连通区域并有 $C \subset S$, 并且可定义 C 的内边界 C^i 与外边界 C^r 如下, 其中 $U(x, \delta)$ 表示 x 以 δ 为半径的邻域。

定义 1 C^i : 对 $\forall \delta > 0$, 若 $x \in C^i$, 则有 $x \in C$ 且 $U(x, \delta) \not\subset C$ 成立, C^r : 对 $\forall \delta > 0$, 若 $x \in C^r$, 则有 $x \notin C$ 且 $U(x, \delta) \cap C \neq \Phi$ 成立。

相应地 $f_C = \{f(x)/x \in C\}$, $f_{C^i} = \{f(x)/x \in C^i\}$, $f_{C^r} = \{f(x)/x \in C^r\}$ 分别表示区域 C, C^i, C^r 上的图像信号, 显然有 $f_{C^i} \subset f_C, f_{C^r} \not\subset f_C$ 成立。当 C 中的图像信息由于各种原因受损或者丢失 (如 $\forall x \in C, f(x) = 0$) 时, 由于 f_C, f_{C^i} 中的信息丢失, 因而必须利用图像信号在空域的相关性。图像信号的特点之一是其信息的表达方式具有很大的冗余, 即区域 C 以外的图像信号依然含有 f_C 中的部分信息, 因而可利用 f_{C^r} 中关于 f_C 的冗余信息进而估计 f_C 中的图像内容。利用图像信号的冗余性估计丢失图像信息的算法可分为基于空域的方法和基于变换域的方法。基于空域的算法中最具代表性的如各种线性插值和非线性插值技术。基于空域的算法由于没有充分考虑人类视觉系统 (HVS) 的特点, 当丢失信息形成一定面积的区域时, 空域算法会造成较严重的不适定 (ill-posed) 问题, 因此在本文中提出了基于变换域估计丢失图像信息的算法。

若 $F_C = L(f_C)$ 表示 f_C 在变换域中的像, 其中 $L(\cdot)$ 表示从空域到变换域的可逆映射, 则基于变换域的最优估计准则即是以 f_{C^r} 为先验信息估计 \hat{F}_C , 使得由 \hat{F}_C 导出的 \hat{f}_{C^i} 依 Frobenius 范数趋近于 f_{C^r} , 如 (1) 式所示。

$$\hat{F}_C = E(F_C/f_{C^r}), \quad \text{s.t.} \min \| \hat{f}_{C^i} - f_{C^r} \|_2 \quad (1)$$

在实际的图像处理应用中, f 的支集 $S: \{(i, j)/0 \leq i, j \leq M-1\}$ 是离散的, 通常对应于二维平面上的矩形区域。若 N_C, N_{C^i} 和 N_{C^r} 表示集合 C, C^i 和 C^r 中的元素数目并设 C^i 中的元素与 C^r 中的元素有一一对应的关系, 则有 $N_C \geq N_{C^r} = N_{C^i}$, 因此由 f_{C^r} 为先验信息估计 \hat{F}_C 显然是一个自由度为 $N_C - N_{C^r}$ 的欠定问题, 这意味着在 (1) 式中的条件下估计 \hat{F}_C 并不具有唯一的最优解, 不同的最优解虽然在 (1) 式意义下的性能相同, 但对图像的恢复结果具有不同的主观视觉效果。

本文的应用背景是针对各种基于 DCT 变换编码的压缩图像在网络传输中由于突发比特误码、信元丢失等原因造成一定数量的 DCT 变换系数丢失, 从而引起图像受损的问题。下一节将提出这种情况下基于变换域的图像恢复算法。

3 变换编码图像丢失系数的最优估计

3.1 方块变换编码图像传输中丢失数据的最优估计技术

在方块变换编码方案如 JPEG 或 MPEG 的帧内编码中, f 被分为 $K \times K$ 个互不重叠、大小相同的子块, 子块尺寸为 $N \times N$ 。若 f_C 为待恢复的受损目标子块, 可定义目标子块的内、外边界信号 f_{C^i} 和 f_{C^r} 。为了简化的目的, 可先假设 f_C 的相邻子块都是正常传输并解

码的图像子块, f_{Cr} 由目标子块的相邻子块中提取。显然根据已知的边界信息 f_{Cr} 进而估计 \hat{F}_C 是一个欠定问题, 因此 \hat{F}_C 并不具有唯一的最优解。但本文中给出 \hat{F}_C 的最优解是如何导出的, 并提出最优解取决于 f_{Cr} 向由变换域基信号的边界分量所张成的内积空间上投影时该内积空间正交基的选择方案。正交基确定后, (1) 式就具有唯一的最优解。

若 $\{\phi_{u,v}(x,y)\}$, $u,v=0,1,\dots,N-1$ 表示 $F_C(u,v)$ 所对应的变换域空间的基信号, 可取出每个基信号在子块边界上的信号分量并将其归一化后得 $\psi_{u,v}(l)$, 则有如 (2) 式的关系成立。

$$\hat{f}_{Ci}(l) = \sum_u \sum_v \hat{F}_C(u,v) \psi_{u,v}(l) \quad (2)$$

由 (1), (2) 式并根据投影定理可知当 $\psi_{u,v}(l)$ 的基向量对 f_{Cr} 完备时, $\hat{F}_C(u,v)$ 取得在这组基向量下的最优解, 并有 $\hat{f}_{Ci} = f_{Cr}$ 成立。因此需要对 $\psi_{u,v}(l)$ 及其基向量的特性进行分析。下面我们以前 DCT 为例, 分析二维离散余弦基信号在图像子块边界上的信号分量的特性。由 (2) 式可得出 $\{\psi_{u,v}(l)\}$ 中任意两个元素 $\psi_{u_1,v_1}(l)$ 、 $\psi_{u_2,v_2}(l)$ 的内积如 (3) 式所示。

$$\begin{aligned} \langle \psi_{u_1,v_1}(l), \psi_{u_2,v_2}(l) \rangle = & \sum_y g[u_1, u_2, v_1(2y+1), v_2(2y+1)] \\ & + \sum_y g[(2N-1)u_1, (2N-1)u_2, v_1(2y+1), v_2(2y+1)] \\ & + \sum_x g[v_1, v_2, u_1(2x+1), u_2(2x+1)] \\ & + \sum_x g[(2N-1)v_1, (2N-1)v_2, u_1(2x+1), u_2(2x+1)] \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $g(a_1, a_2, a_3, a_4) = \cos[a_1\pi/(2N)] \cos[a_2\pi/(2N)] \cos[a_3\pi/(2N)] \cos[a_4\pi/(2N)]$ 。

从 (3) 式可以证明并得出以下的结论:

- (1) 若 $u_1 \neq u_2, v_1 \neq v_2$ 则有 $\langle \psi_{u_1,v_1}(l), \psi_{u_2,v_2}(l) \rangle = 0$, 即 $\psi_{u_1,v_1}(l)$ 与 $\psi_{u_2,v_2}(l)$ 正交。
- (2) 若 $u_1 = u_2$ 则当 $v_1 + v_2 = \text{奇数}$ 时, 有 $\langle \psi_{u_1,v_1}(l), \psi_{u_2,v_2}(l) \rangle = 0$; 同样若 $v_1 = v_2$ 则当 $u_1 + u_2 = \text{奇数}$ 时, 有 $\langle \psi_{u_1,v_1}(l), \psi_{u_2,v_2}(l) \rangle = 0$ 。

由结论 (1), (2) 可确定 $\{\psi_{u,v}(l)\}$ 中有一组两两正交的向量, 其数量为 $2N$, 并将这组向量归一化后的集记为 Ψ^1 。而对于 $\{\psi_{u,v}(l)\}$ 中剩下的元素中, 若干个元素按一定规则的线性组合可以得出另外一组彼此两两正交的向量, 将这组向量的集记为 Ψ^2 , 可以证明 Ψ^1 与 Ψ^2 是两个相互正交的子空间, Ψ^2 的定义可见结论 (3)。

(3) 令 $P = (N-2)/2$, 则按 (4) 式的规则, 将 $\{\psi_{u,v}(l)\}$ 去掉 Ψ^1 中的元素后对剩下的向量按若干个为一组进行线性组合并归一化后, 得到的向量将彼此两两正交且与 Ψ^1 正交。

$$\sum_i (\psi_{u_i,v}(l) - \psi_{v,u_i}(l)), \quad \forall \psi_{u_i,v}(l), \psi_{v,u_i}(l) \notin \Psi^1, \quad u_i + u_j = \text{偶数}, \quad i = 0, 1, \dots, P-1-v \quad (4)$$

按结论 (3) 可得出 Ψ^2 中有 $2N-4$ 个两两正交的基向量, 定义 $\Psi = \Psi^1 \cup \Psi^2$, 则 Ψ 的秩为 $4N-4$, 而 f_{Cr} 的维数为 $4N-4 \times 1$, 因此 Ψ 对于 f_{Cr} 来说是完备的, 且 Ψ 为一组标准正交基, 根据 Parseval 定理, f_{Cr} 与其在 Ψ 上的投影是完全重合的, 并有如 (5) 式的关系成立。

$$\hat{f}_{Ci}(l) = \sum_{i=0}^{4N-5} \langle \Psi(i), O_f(l) \rangle \Psi(i) = f_{Cr}(l) \quad (5)$$

此时当 $\psi_{u,v}(l) \in \Psi^1$ 时有 $\hat{F}_C(u,v) = \langle \psi_{u,v}(l), f_{Cr}(l) \rangle$ ，而对于 Ψ^2 中基所对应的 $\hat{F}_C(u,v)$ 从 (4),(5) 式也可导出。

在标准的 JPEG 或 MPEG 中图像划分成 8×8 的子块，此时根据上面的结论， Ψ 中共有 $4 \times 8 - 4 = 28$ 个基，其中 Ψ^1 中的 16 个基是从 $\{\psi_{u,v}(l)\}$ 中直接选取， Ψ^1 中基的选取可有多种方案，而 Ψ^2 中的基是由 $\{\psi_{u,v}(l)\}$ 中若干元素的线性组合并归一化后得到的。 Ψ^1 中的任一基与 f_{Cr} 的内积即等于基所对应的变换系数的估计值，而 Ψ^2 中的任一基与 f_{Cr} 的内积对应于多个变换系数的估计值。图 2 中给出了子块尺寸为 8×8 时 Ψ 中 28 个基的一种选取方案，图中的 0-27 的数字分别标识出了 28 个基所对应的变换系数的位置。

0	1	16	17	16	17	16	17
2	3	18	19	18	19	18	19
16	18	4	5	20	21	20	21
17	19	6	7	22	23	22	23
16	19	20	22	8	9	24	25
17	19	21	23	10	11	26	27
16	19	20	22	24	26	12	13
17	19	21	23	25	27	14	15

图 2 采用 DCT 变换 8×8 子块边界信号正交基的一种选取方案

以上的讨论基于的先决条件是受损块的相邻子块都是成功传输并正常解码的，而在实际的网络上的图像或视频信号传输应用中，有两种情况会造成若干连续的子块受损。(a) 由于许多编码器采用了游长编码 (Variable Length Coding)，因此一个单比特误码可能破坏同步信号，在解码端将导致同步信号以下的所有信息丢失直到出现下一个同步信号。(b) 由于网络的突发性错误、分组或信元的丢失都可能引起连续多个子块的信息受损。当出现连续多个子块受损的情况时，对于单个受损子块可以假设其相邻子块都是正常解码的，在对整幅图像完成一次处理后，再重复进行一次或多次处理即可得到满意的效果。

3.2 最优估计的性能分析

设子块 $F_C(u,v)$ 中的 K 个变换系数 $\{F(u_i, v_i), i = 1, 2, \dots, K\}$ 在传输中丢失，若不作任何处理时， $F_C(u,v)$ 其边界上的不连续性可用 $D'_{ir} = \|f'_i(l) - f_r(l)\|_2$ 来度量，同时此时的信噪比为 $SNR_1 = (\sum F^2(u,v) - \sum_K F^2(u_i, v_i)) / \sum_K F^2(u_i, v_i)$ 。应用本文中的算法处理后， $F_C(u,v)$ 在边界上的不连续性为 $\hat{D}_{ir} = \|\hat{f}_i(l) - f_r(l)\|_2$ ，若只有 Ψ^1 中的基对应的系数丢失，则 (6) 式的关系成立。

$$\begin{aligned}
 \hat{D}_{ir} &= \|\hat{f}_i(l) - f_r(l)\|_2 \geq \|\hat{f}_i(l) - f_i(l)\|_2 - \|f_i(l) - f_r(l)\|_2 \\
 &= \left\| \sum_i (\hat{F}(u_i, v_i) - F(u_i, v_i)) \psi_{u_i, v_i}(l) \right\|_2 + \|f_i(l) - f_r(l)\|_2 \\
 &= \sum_i (\hat{F}(u_i, v_i) - F(u_i, v_i))^2 + \|f_i(l) - f_r(l)\|_2 \\
 &\quad \times \sum_i (\hat{F}(u_i, v_i) - F(u_i, v_i))^2 \leq \hat{D}_{ir} + \|f_i(l) - f_r(l)\|_2 \approx \|f_i(l) - f_r(l)\|_2 \quad (6)
 \end{aligned}$$

由 (6) 式可得出此时的信噪比增益 G 如 (7) 式所示。

$$G = \sum_i F^2(u_i, v_i) / \sum_i (\hat{F}(u_i, v_i) - F(u_i, v_i))^2 \geq \sum_i F^2(u_i, v_i) / \|f_i(l) - f_r(l)\|_2 \quad (7)$$

4 实验模拟结果

为了验证本文中所提出算法的性能, 我们在模拟实验中选择图像子块的尺寸为 8×8 , Ψ 中正交基的选取按图 2 的方案, 并只对 $\{F_{i,j}(u, v)\}$ 中左上角的 16 个变换系数进行补偿, 即 $F_{00} \sim F_{33}$, $0 \leq u, v \leq 3$ 。其中 $F_{00}, F_{01}, F_{10}, F_{11}, F_{22}, F_{23}, F_{32}, F_{33}$ 8 个变换系数根据图 2 的方案可以直接求出, 而其余 8 个系数分别对应于 4 个正交基, 可根据 (4) 式求出。

实验中源图像选择了 8 bit, 256×256 的 LENA 图像, GIRL 图像与 BABOON 图像, 对于 LENA 图像给出了两种受损情况下图像的恢复效果, 一种是每个受损图像子块周围都是正常解码的图像子块, 另一种是受损图像子块是连续出现的。图 3, 图 4 列出了 LENA 图像, GIRL 图像和 BABOON 图像的受损情况以及图像恢复的效果, 其中 LENA 图像和 BABOON 图像中受损子块的 DCT 系数全部丢失, 而 GIRL 图像中受损子块只有 F_{00}, F_{01}, F_{10} 丢失。

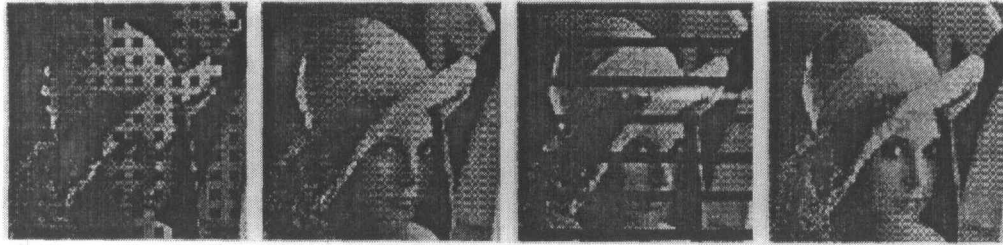


图 3 受损 LENA 图像及其恢复效果



图 4 受损 GIRL, BABOON 图像及其恢复效果

表 1 中给出了两种情况下受损图像的峰-峰信噪比, 以及图像恢复后信噪比的改善效果, 重建图像信噪比可提高 10-20dB, 主观质量从 1 级可改善达到 3-4 级。由表 1 与图 3, 图 4 可看出对于第一种情况由于在估计受损变换系数时具有更多的先验信息, 因而无论在主观视觉效应以及信噪比的增益方面都有更好的效果。而对于当图像子块连续受损情况下如何进一步改善图像的恢复效果还有待研究。

表 1 图像恢复结果的信噪比改善情况

PSNR	LENA(1)	LENA (2)	GIRL	BABOON
受损图像 (dB)	13.88	13.99	16.39	13.42
恢复图像 (dB)	30.70	27.69	33.23	31.03

5 结束语

本文提出的基于变换域利用相邻子块的边界信息估计受损子块信息的技术, 优于传统的图像恢复技术, 即使对于含有大量高频信息的图像如 BABOON 等, 也有良好的效果。但本文中的算法只适用于帧内编码, 而不适用于采用了帧间预测的各种视频编码方案中的帧间编码, 对于提高帧间编码信息稳健性的技术还需更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] M. Ghanbari, Two-layer coding of video signals for VBR networks, IEEE J. on Select Areas Commun., 1989, 7(6), 771-781.
- [2] K. H. Tzou, Post filtering for cell loss concealment in packet video, In Proc. SPIE Conf. Visual Commun., Image Processing, Philadelphia, PN, Nov, 1989, 1620-1627.
- [3] P. Haskell, D. Messerschmitt, Reconstructing lost video data in a lapped orthogonal transform based coder, In Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Albuquerque, NM, Apr., 1990, 1985-1988.
- [4] Wang Yao, Zhu Qin-Fan, Shaw L, Maximally smooth image recovery in transform coding, IEEE Trans. on Commun., 1993, 41(10), 1544-1551.

THE RECONSTRUCTION OF IMAGE INFORMATION LOST IN TRANSMISSION

Cong Jian Li Zaiming

(102 Lab, Dept. of Comm. and Info., UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper considers the model of optimal estimation of image information when some of the image data are lost due to transmission errors. A new technology is proposed for image recovery in transform coding based on the boundary information of adjacent blocks, the algorithm for estimating the optimal solution and the analytical form of the gain of SNR. Experimental results show that when SNR increases 10-20 dB, the visual quality can improve from 1 to 3 or 4. Compare with the other theme, the algorithm proposed in this paper improves the quality of both low and high frequency information and can easily be implemented.

Key words Boundary condition, Transform coding, Image recovery

丛 键: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向: 图像处理, 图像编码.

李在铭: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 图像处理, 图像编码, 图像通信工程, 信号处理.