

# 传输图像的子波域插值恢复算法

马国强, 郭宝龙, 冯宗哲

(西安电子科技大学测控工程, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 在丢包信道中传输子波编码图像时, 存在图像重构问题. 本文提出了一种新的图像恢复算法—树恢复子波域插值算法, 可以用于恢复丢失的子波树系数. 该算法利用二维子波变换具有的水平和垂直方向边缘检测能力, 采用数学形态学膨胀运算, 恢复已丢失的表示边缘信息的高频系数. 为了保持图像边缘的尖锐性和方向性, 本文采用了高频系数指导下的低频系数恢复技术. 文章最后给出的仿真结果验证了该算法的有效性.

**关键词:** 图像传输; 插值; 错误隐藏; 子波变换

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 04-0552-04

## An Approach of Wavelet Domain Interpolation for Image Reconstruction in Transmission

MA Guo-qiang, GUO Bao-long, FENG Zong-zhe

(Dept. of Measurement Control Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Transmission of wavelet-coded images over lossy packet networks presents an image reconstruction problem. A new image reconstruction algorithm called Wavelet Domain Interpolation for tree Reconstruction (WDIR) to conceal coefficients loss in Wavelet-Trees is developed. The reconstruction of the lost high-frequency coefficients is given by using mathematical morphological dilation operator based on the horizontal and vertical edge detection ability of 2-D wavelet transform. To maintain the sharpness of edges, we reconstruct the lost low-frequency coefficients under the direction of high-frequency coefficients. The algorithm performs well in performance simulations.

**Key words:** image transmission; interpolation; error concealment; wavelet transform

### 1 引言

当子波压缩图像在丢包信道中传输时, 会发生子波系数丢失现象. 如何恢复丢失的数据包或子波系数是图像通信中的一个重要问题. 针对这个问题, 许多学者研究鲁棒性图像传输算法, 即在传输中有误码或者丢包现象时, 如何使接收到的图像具有优良的质量. J Rogers 和 P Cosman 提出了打包子波零树算法 (Wavelet zerotree image compression with packetization, 简称 PZW)<sup>[1]</sup>, S D Servetto 等人提出的基于子波变换的多描述图像编码算法<sup>[4]</sup>, A C hung 等人提出容错锥形矢量量化图像压缩算法<sup>[5]</sup>. 研究发现, 这些算法主要是关于发送方的数据量化和数据组织方法方面的研究, 却忽视了对接收方如何充分利用接收到的数据恢复图像这个问题的研究. 例如, PZW 算法对于丢失的低频系数采用八邻域求平均的办法进行恢复, 对于高频系数则用直接置零的方法. 这种恢复方法过于简单, 只是考虑到图像的平滑性, 而没有考虑到边缘的尖锐性和方向性, 从而导致图像边缘不能很好地恢复. 而边缘信息的丢失将严重影响图像的主观质量.

本文利用新颖的图像子带插值概念<sup>[6]</sup>, 研究并提出一种新的图像恢复算法—树恢复子波域插值算法 (Wavelet Domain Interpolation for tree Reconstruction, 简称 WDIR), 以恢复丢失的子波树. 该算法属于接收端的错误隐藏技术, 它利用二维子波变换具有的水平和垂直方向边缘检测能力, 采用数学形态学膨胀运算, 恢复已丢失的代表边缘信息的高频系数. 为了保持图像边缘的尖锐性和方向性, 本文采用了高频系数指导下的低频系数恢复技术, 并且依据高频系数的相似性, 降低了算法复杂度. 实验表明: 该算法对于子波系数丢失后的图像恢复是非常有效的.

### 2 图像二维子波分解的一些特性

#### 2.1 图像二维子波分解

在图像编码中使用的二维离散子波变换等同于一个分层的子带系统, 各子带的频率按对数划分, 表示二倍频程分解. 对于二维可分离子波, 二维变换就是对图像的行列交替实施一维变换. 这样一幅图像在二维频域可以分解为四个子带. 例如我们可以将  $y_1^{LL}$  分解为四个子带  $y_2^{LL}$ ,  $y_2^{LH}$ ,  $y_2^{HL}$  和  $y_2^{HH}$ . 这样,

分别对图像的列、行实施一维子波分解并迭代,就可以形成多级塔形分解结构(如图 1 所示).在多级塔形分解结构中,第  $i$  级的图像  $y_{i-1}^{LL}$  被分解为四个子图  $y_i^{LH}, y_i^{HL}, y_i^{HH}, y_i^{LL}, i = 1 \dots s$ . 不同级的子图系数实质上反映了图像在不同尺度下的低频和高频分量.  $i$  值小的级对应的是图像在小尺度下的低频和高频分量.而  $i$  值大的级对应的是图像在大尺度下的低频和高频特性.我们称上标为 HL 的所有子图为 HL 区,同理,可以定义 LH 区、HH 区和 LL 区.

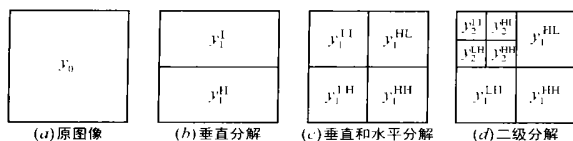


图 1 图像二维子波分解各子带形成过程

## 2.2 边缘方向选择性的抽取

方向选择性的抽取是指由于各个子带形成过程的不同,高频子带大系数所在的空间方向与原图像边缘的方向有关.利用这种对应关系,可以根据高频子带的大系数位置,推断原图像对应位置是否在边缘上以及边缘的方向.这里“抽取”的含义是指:如果原图中沿某方向有边缘存在的话,子波分解后会在相应区域出现大系数.

具体地说,HL 区系数表示上一级输入信号在水平方向的高频、垂直方向的低频分量,因此 HL 区系数可以比较明显地表达出垂直方向的边缘信息,而对于水平方向的边缘不敏感.同理,LH 区系数主要抽取出水方向边缘信息,HH 区系数主要表达出斜方向上的边缘信息.在本文算法中,这种边缘方向性信息将发挥两个作用:(1)用于决定高频系数恢复时膨胀运算的方向;(2)用于低频系数恢复时判断丢失的低频系数所在边缘的方向.

## 2.3 高频系数相似性

高频系数相似性是指:图像分解后的各高频区大系数分布相似.文献[2]从功率谱的角度对此问题做了分析,论证了高频系数的相似特性.由于各级高频系数之间存在着相似性,意味着可以只利用一级的高频系数来指导 LL 区系数的恢复,而不是采用所有的高频系数来处理,从而极大地减小了 WDIR 算法的计算复杂度.

## 3 WDIR 图像恢复算法

### 3.1 定义

定义 WDIR 算法中有关符号及表示的含义如下

$wc$ :接收方接收到的子波系数;

$B(x, y)_0:wc$  中,在 LL 区第  $x$  行,第  $y$  列上的元素(下标 0 表示 LL 区);

$T(x, y):wc$  中,以  $B(x, y)_0$  为根的一颗树(依据参考文献[7]中的树的定义);

$B(x, y)_i^{HL}:T(x, y)$  中,对应于原图像第  $i$  次分解后在 HL 方向的高频系数(数据块);

$B(x, y)_i^{LH}:T(x, y)$  中,对应于原图像第  $i$  次分解后在 LH 方向的高频系数(数据块);

$B(x, y)_i^{HH}:T(x, y)$  中,对应于原图像第  $i$  次分解后在 HH 方向的高频系数(数据块);

$t(x, y):T(x, y)$  二值化后的结果;

$b(x, y)_i^{HL}:B(x, y)_i^{HL}$  二值化后,取 1 处的坐标的集合;

$b(x, y)_i^{LH}:B(x, y)_i^{LH}$  二值化后,取 1 处坐标的集合;

$b(x, y)_i^{HH}:B(x, y)_i^{HH}$  二值化后,取 1 处的坐标的集合;

其中二值化是指,对任意元素  $w$ ,若  $w \neq 0$ ,则  $w$  赋值为 1,否则,  $w$  赋值为 0.

根据上述定义,如果对原图像进行了  $s$  级分解,  $T(x, y)$  可以表示为

$$T(x, y) = \{B(x, y)_0, B(x, y)_i^{HL}, B(x, y)_i^{LH}, B(x, y)_i^{HH} / 1 \leq i \leq s\} \quad (1)$$

### 3.2 丢失数据的判定

在接收方,当到达设定的时间阈值后,如果某些数据包仍然没有到达,那么就判定它们在传输过程中丢失了.即从已经接收到的子波树的编号,我们可以知道哪些树丢失了.现在的问题是:这些丢失的子波系数如何由 WDIR 算法来恢复?

下面以  $T(x, y)$  丢失为例说明具体算法.3.3 节是  $B(x, y)_i^{HL}, B(x, y)_i^{LH}(1 \leq i \leq s)$  的恢复算法,3.4 节是  $B(x, y)_0$  的恢复算法.

### 3.3 估计高频系数

在估计高频系数的过程中,要用到数学形态学的膨胀运算.膨胀算符<sup>[8]</sup>表示为  $\odot$ ,  $A$  用  $B$  来膨胀表示为  $A \odot B$ ,其定义为:

$$A \odot B = \{x | [(B)_x \cap A] \neq \emptyset\} \quad (2)$$

式(2)表明用  $B$  来膨胀  $A$  的过程:先用  $B$  做关于其原点的映射,再将其映象平移  $x$ ,这里  $A$  与  $B$  的映象的交集不为空集.

图像的边缘一般是连续的.对于 HL 区,由于它主要抽取的是纵向边缘,所以当某个丢失系数所在位置的上面或者下面是大系数的时候,这个系数可能是大系数.所以,可以使用膨胀运算把丢失区附近已有的大系数点(反映边缘信息的系数)纵向延伸到丢失区.同理,LH 区也按照这个原理进行膨胀.由于两个相邻子波树同时丢失的概率很小,所以在每个高频区采用一次膨胀运算,就可以将丢失的单颗子波树的高频大系数位置估计出来.本文中估计丢失的高频系数思路是首先运用膨胀运算预测丢失区哪些位置的系数会是大系数,然后再估计这些大系数点的具体取值.

对于  $B(x, y)_i^{HL}$  的恢复,根据上述原理,可以由  $B(x-1, y)_i^{HL}$  和  $B(x+1, y)_i^{HL}$  来估计.

第一步:将  $B(x-1, y)_i^{HL}$  和  $B(x+1, y)_i^{HL}$  二值化,并求得  $b(x-1, y)_i^{HL}$  和  $b(x+1, y)_i^{HL}$ ;令  $a(x, y)_i^{HL}$  为  $B(x, y)_i^{HL}$  包含的所有系数的坐标的集合.

第二步:对  $b(x-1, y)_i^{HL}$  和  $b(x+1, y)_i^{HL}$  分别进行膨胀运算.

$$r(x-1, y)_i^{HL} = b(x-1, y)_i^{HL} \odot STRUCT \quad (3)$$

$$r(x+1, y)_i^{HL} = b(x+1, y)_i^{HL} \odot STRUCT \quad (4)$$

其中,  $STRUCT$  是膨胀的结构元素:

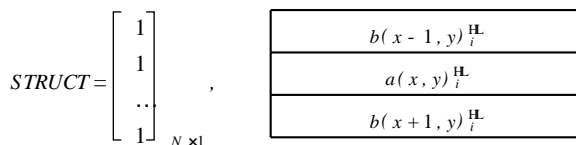


图2  $b(x-1, y)_i^H$ ,  $a(x, y)_i^H$  与  $b(x+1, y)_i^H$  的位置关系

$$N = \begin{cases} \lfloor L_{num}/2 \rfloor, & \text{如果 } \lfloor L_{num}/2 \rfloor \text{ 是奇数} \\ \lfloor L_{num}/2 \rfloor + 1, & \text{如果 } \lfloor L_{num}/2 \rfloor \text{ 是偶数} \end{cases}$$

其中  $num$  是  $b(x-1, y)_i^H$  中一列元素的个数;不同尺度的子图,由于  $num$  不同,得到的  $N$  不同; $\lfloor \cdot \rfloor$  表示下取整.  $STRUCT$  的原点是它的中心元素.

由于  $b(x-1, y)_i^H$ ,  $a(x, y)_i^H$  和  $b(x+1, y)_i^H$  之间存在如图 2 所示的空间关系,  $r(x-1, y)_i^H$ ,  $r(x+1, y)_i^H$  将与  $a(x, y)_i^H$  有交集.  $b(x, y)_i^H$  集合按照式(5)被重新赋值.

$$b(x, y)_i^H = (a(x, y)_i^H - r(x-1, y)_i^H) \cup (a(x, y)_i^H - r(x+1, y)_i^H) \quad (5)$$

因为  $a(x, y)_i^H$  包含  $b(x, y)_i^H$  所有可能包含的元素,所以  $b(x, y)_i^H \subseteq a(x, y)_i^H$ .  $b(x, y)_i^H$  中的元素,是一些点的坐标.这些坐标,就是估计的  $B(x, y)_i^H$  中大系数的坐标.

同理,可以进行  $B(x, y)_i^{LH}$  中大系数坐标的估计.

### 第三步 数值估计

对  $\forall (a, b) \in B(x, y)_i^H$ ,  $(a, b)$  是在  $wc$  中坐标.

若  $(a, b) \notin b(x, y)_i^H$ , 则  $= 0$ ;

若  $(a, b) \in b(x, y)_i^H$ , 则 赋值为与  $B(x, y)_i^H$  同列的所有非零系数的平均值.

同理,可以对  $B(x, y)_i^{LH}$  中大系数的数值进行估计.对于  $B(x, y)_i^{HH}$  中的大系数数值,WDIR 不予估计.

### 3.4 估计低频系数

低频子带的高度相关表明丢失的系数可以通过其相邻系数来恢复<sup>[1]</sup>.由于高频反映的就是图像边缘的情况,并且边缘一般是连续的.所以,可以根据恢复出来的高频系数来指导选择低频相邻系数.下面以恢复  $B(x, y)_0$  为例进行说明.因为高频子带系数存在一定相似性,为了减小算法复杂性,可以只选择某一级(假设为第  $D$  级)分解产生的高频系数  $B(x, y)_D^H$  和  $B(x, y)_D^{LH}$  来指导恢复.算法如下:

**第一步**  $\max^H = \max\{| \cdot | / B(x, y)_D^H\}$ ,  $\max^{LH} = \max\{| \cdot | / B(x, y)_D^{LH}\}$

**第二步** 设定阈值,用于判断  $T(x, y)$  是否处于有明显横向或纵向边缘区域.若  $|\max^H - \max^{LH}| < \cdot$ , 认为  $T(x, y)$  处于平滑区域、有斜向边缘或者复杂纹理区域,边缘信息不易利用;否则,认为有易于利用的横向或纵向边缘.

数组  $E(x, y)$  中填入  $B(x, y)_0$  在 LL 区的八邻域系数.若  $B(x, y)_0$  处于 LL 区的边缘或者其相邻系数也被丢失,即某些邻域系数不可用,那么  $E(x, y)$  中的数值将不足 8 个.

若  $|\max^H - \max^{LH}| < \cdot$ , 则  $B(x, y)_0 = \text{median}(E(x, y))$ ; 其中,函数  $\text{median}()$  表示对集合中所有元素取中值.实验验证,取中值比求平均恢复的数值更加接近丢失的系数.

若  $\max^H - \max^{LH}$ , 表明有纵向边缘

(1) 若  $B(x-1, y)_0$  和  $B(x+1, y)_0$  均可用,  $B(x, y)_0 = \text{mean}(B(x-1, y)_0, B(x+1, y)_0)$ ; 其中,函数  $\text{mean}()$  表示求平均.

(2) 若  $B(x-1, y)_0$  和  $B(x+1, y)_0$  有一个不可用,  $B(x, y)_0$  赋值为可用的邻域系数的值;

(3) 若  $B(x-1, y)_0$  和  $B(x+1, y)_0$  均不可用,  $B(x, y)_0$  不被重新赋值.

若  $\max^{LH} - \max^H$ , 表明有横向边缘

(1) 若  $B(x, y-1)_0$  和  $B(x, y+1)_0$  均可用,  $B(x, y)_0 = \text{mean}(B(x, y-1)_0, B(x, y+1)_0)$ ;

(2) 若  $B(x, y-1)_0$  和  $B(x, y+1)_0$  有一个不可用,  $B(x, y)_0$  赋值为可用的邻域系数的值;

(3) 若  $B(x, y-1)_0$  和  $B(x, y+1)_0$  均不可用,  $B(x, y)_0$  不被重新赋值.

## 4 实验结果与讨论

实验中采用的传输方法是打包子波零树算法(PZW)<sup>[11]</sup>.它对原始图像用 9/7 子波<sup>[3]</sup>进行了四级分解.采用的实验图像是 Lena, 512 × 512 8bpp 的灰度图像.最初的压缩目标是 0.2bpp, 在打包后,实际数据率为 0.209bpp.低频恢复采用第二级分解后的 LH 区和 HL 区系数来指导恢复.为了便于比较,也采用参考文献[1]中的三个丢包率:1%、10%、20%.实验结果如表 1 所示.针对不同的丢包率,每种情况进行了 100 次实验,表 1 给出的是平均值.从表 1 的数据比较可以看出:在不同的丢包率情况下,WDIR 算法都比文献[1]的恢复方法性能优越;而且丢包率越大,WDIR 的性能越好.值得指出的是,在丢包率很低时提高图像恢复的 PSNR 很难.极限情况即丢包率为零时,恢复图像的 PSNR 为 32.19dB.另外,WDIR 算法因为在估计过程中考虑到了边缘的连续性且恢复了一部分高频系数,对于图像边缘的恢复比传统的方法要好.主要表现在减少了边缘区域的“黑斑”现象,从而使得图像在主观质量上有较大提高,这一点从图 3 可以清楚看出.图 3 是压缩率为 0.209bpp、丢包率在 10% 时,采用两种算法的恢复后图像的比较.图 3(b)在边缘处的“黑斑”(如 Lena 帽子前沿、胳膊上的),在图 3(c)中已明显减少.

表 1 八邻域平均低频系数恢复与 WDIR 恢复图像 PSNR 比较(dB)

丢包率	1 %	10 %	20 %
算 法			
八邻域平均低频恢复	31.15	27.02	24.27
WDIR 算法恢复	31.26	27.73	25.74



图 3 不同算法恢复的图像效果比较. (a) 不恢复; (b) 低频八邻域平均恢复; (c) WDIR 算法恢复

本文提出了一种图像传输过程中丢失子波系数的恢复算法——树恢复子波域插值图像恢复算法(WDIR)。它充分利用二维子波分解对于图像边缘的抽取特性和边缘的连续性,较好地估计了丢失的子波系数。在只有高频或低频系数丢失的情况下,也可以选择使用该算法的一部分进行恢复。

#### 参考文献:

- [1] J Rogers, P Cosman. Wavelet zerotree image compression with packetization [J]. IEEE Sig Proc Letters, 1998, 5(5): 105 - 107.
- [2] R Rinaldo, G Calvayno. Image coding by block prediction of multiresolution subimages [J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(7): 909 - 920.
- [3] J D Villasenor, et al. Wavelet filter evaluation for image compression [J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(8): 1053 - 1060.
- [4] S D Serveto, et al. Multiple description wavelet based image coding [J]. IEEE Trans Image Processing, 2000, 9(5): 813 - 826.
- [5] A C Hung, et al. Error-resilient pyramid vector quantization for image compression [J]. IEEE Trans Image Processing, 1998, 7(10): 1373 - 1386.
- [6] 石峻, 郭宝龙. 一种新的图像插值方法——子带插值 [J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(5): 684 - 688.
- [7] J M Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1993, 2(12): 3445 - 3462.
- [8] 章毓晋. 图像工程(上册): 图像处理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

#### 作者简介:



马国强 男, 1976 年 10 月生于山东潍坊, 工学硕士, 主要研究方向: 容错性图像编解码算法, 模式识别。



郭宝龙 男, 1962 年 9 月生于陕西西安, 工学博士, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师; AAAS 国际会员, 中国电子学会高级会员, 主要研究领域: 模式识别与智能系统, 图像处理与图像通信。