

## 基于方向提升小波变换的多描述图像编码

张楠<sup>1</sup> 吕岩<sup>2</sup> 吴枫<sup>2</sup> 尹宝才<sup>1</sup>

**摘要** 本文提出一种基于方向提升小波变换的多描述图像编码方法, 以避免压缩图像在互联网和无线网络环境下因数据包传输出错或丢失而导致的图像质量严重下降. 基本思想是在空域将一幅图像按梅花形下采样为两个描述, 为解决传统空域下采样多描述编码技术编码效率低的问题, 提出能充分利用相邻像素相关性的方向提升小波变换, 并通过四叉树的分割实现方向的组织和选择. 边缘信道解码出的低分辨率图像, 通过插值算法实现原始分辨率单描述的图像重建. 中央信道解码出的图像, 通过数据融合算法实现两描述的图像重建, 进而进一步改善图像视觉质量.

**关键词** 多描述编码, 梅花下采样, 提升小波变换, 方向预测, 图像插值  
**中图分类号** TP391

### Multiple Description Image Coding Based on Directional Lifting Wavelet Transform

ZHANG Nan<sup>1</sup> LU Yan<sup>2</sup> WU Feng<sup>2</sup> YIN Bao-Cai<sup>1</sup>

**Abstract** In this paper, a new multiple description image coding scheme based on directional lifting wavelet transform is proposed, which can avoid the serious quality degradation of compressed images in the Internet or wireless environment due to the packet error or packet loss. The basic idea is to divide an image into two descriptions with quincunx downsampling. To tackle the problem of low coding efficiency in the traditional spatial domain multiple description image coding techniques, we propose a directional lifting technique to extensively exploit the correlations among neighboring pixels, in which the lifting directions are selected and organized based on the quad-tree partition. A novel interpolation scheme is employed in the side decoder to reconstruct one description with full resolution. The data fusion algorithm is employed in the central decoder to reconstruct the whole image, which can further improve the quality of the reconstructed image.

**Key words** Multiple description coding, quincunx downsampling, lifting wavelet transform, directional prediction, image interpolation

## 1 引言

网络及多媒体技术的发展使流媒体的大规模应用成为可能, 但同时, 网络环境的复杂化及其导致的图像传输质量的下降又极大阻碍了流媒体服务的发展, 而现有的解决方法均在不同程度上削弱了网络流媒体的实时传输能力. 因此, 实时、鲁棒的流媒体传输成为本领域核心问题. 多描述编码 (Multiple

description coding, MDC) 方法是一种典型的抗误码技术, 它能够有效地获得最佳的服务质量. 多描述图像编码方法通常将一幅图像划分成几个描述, 然后独立地编码各个描述, 这些被编码的图像描述根据其到达接收端的实际情况做联合解码或独立解码. 多描述编码方法最重要的一个特点是, 当任何一个或几个描述被接收就能重建一个视觉上可接受的图像. 而在比较流行的可伸缩编码中, 只有当基本层被可靠接收时才可以解码完整的图像. 因此, 多描述编码比可伸缩编码在抗误码方面具有更多的优势.

多描述的概念最早出现在 20 世纪 70 年代末期, 是由 Bell 实验室在解决电话信道中语音编码问题时提出的<sup>[1]</sup>, 90 年代末期将其应用到图像编码中. 在近十年中, 各种各样的图像多描述方法得到了广泛研究和发展的, 主要包括空间下采样方法<sup>[2]</sup>、相关变换方法<sup>[3,4]</sup>、标量及矢量量化方法<sup>[5]</sup>、运动补偿方法<sup>[6,7]</sup>等.

早期的空间下采样方法是通过直接下采样方法实现多描述方案的, 这种方案很难有效地去除相邻像素间的相关性, 因而编码效率低. 变换域的多描述编码方法中的多描述标量量化 (Multiple description

收稿日期 2005-7-22 收修稿日期 2006-2-14  
Received July 22, 2005; in revised form February 14, 2006  
国家自然科学基金 (60572104, 60533030, 60375007), 国家 863 计划 (2006AA01Z317), 北京市自然科学基金 (40410031, 4061001), 多媒体与智能软件技术北京市重点实验室开放基金项目资助  
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60572104, 60533030, 60375007), the National High Technology Research and Development Program of P. R. China (2006AA01Z317), Beijing Natural Science Foundation (40410031, 4061001), Open Project of Beijing Multimedia and Intelligent Software Key Laboratory of Beijing University of Technology  
1. 北京工业大学多媒体与智能软件技术北京市重点实验室 北京 100022 2. 微软亚洲研究院 北京 100080  
1. Multimedia and Intelligent Software Technology, Beijing Municipal Key Laboratory, College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022  
2. Microsoft Research Asia, Beijing 100080  
DOI: 10.1360/aas-007-0567

scalar quantizer, MDSQ), 多描述相关变换编码 (Multiple descriptions transform coding, MDTC) 方法是最具代表性的方法, 而 MDSQ 中的索引分配和 MDTC 中的相关变换的设计都很复杂, 并且均不与现有的图像编码标准兼容, 与此同时, 整个的编码性能不如所料的那样能很好地平衡边缘和中央信道的编码效率.

本文提出一种基于方向提升小波变换的多描述图像编码方法, 基本思想是在空域将一幅图像按梅花形下采样为两个描述, 然后利用方向提升小波变换对每个描述进行独立编码. 选择这种空域技术进行多描述编码有两方面的原因: 首先, 空域方法非常简单, 并且很容易与标准兼容; 其次, 空域方法提供了更多改进边缘信道主观视觉质量的空间. 然而, 其缺点仍然是低编码效率问题. 为解决该问题, 本文利用方向提升小波变换来进一步有效地消除相邻像素间的冗余, 借此提高编码性能. 提升小波方向的选择满足了率失真优化模型. 本文方法还结合插值恢复

技术和数据融合算法来提高边缘和中央信道图像质量. 该方法不仅实现简单, 同时也与现有行业标准兼容, 在实现高压缩效率的同时具备了抗误码功能, 因而是一种简单有效且实用的方法.

## 2 算法框架

本文讨论包含两个描述的多描述编码方法, 基本思想是利用方向提升小波变换实现空间梅花下采样的两描述编码. 图 1 给出了对应算法框架, 首先采用梅花形下采样方法将一幅图像  $I$  在空间域分成两幅子图  $I_{sd1}$  和  $I_{sd2}$ , 称为两个独立的描述, 然后利用方向提升小波变换对两个描述进行独立的编码. 如果接收端只接收到某一个描述, 则将该描述进行独立解码, 解码出子图  $\hat{I}_{sd1}$  或  $\hat{I}_{sd2}$ , 然后对子图  $\hat{I}_{sd1}$  或  $\hat{I}_{sd2}$  进行插值恢复出原始分辨率下的图像  $\hat{I}_{s1}$  或  $\hat{I}_{s2}$ ; 如果同时接收到两个描述, 则对  $\hat{I}_{s1}$  和  $\hat{I}_{s2}$  做数据融合形成更高质量的重建图像  $\hat{I}$ .

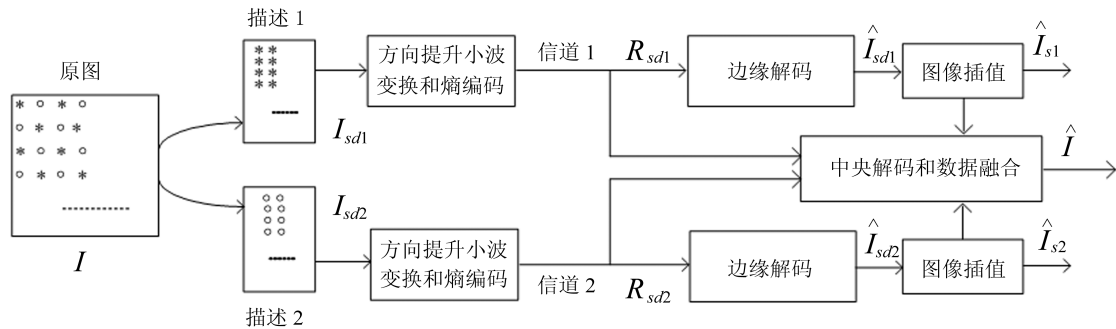


图 1 算法框架

Fig. 1 Algorithm framework

## 3 方向提升小波变换

### 3.1 问题分析

假设对一个二维信号做小波变换, 不失一般性, 该二维信号可先在垂直方向做一次一维小波变换, 然后在水平方向上再做一次一维的小波变换. 提升技术<sup>[8,9]</sup>是整数小波变换的基础, 在这里首先简要回顾由 Daubechies 等<sup>[8]</sup>提出的传统提升小波变换. 我们知道, 提升技术分为分裂 (Split)、预测 (Predict) 和更新 (Update) 3 个步骤, 具体过程如下:

对于一个二维信号  $x(m, n)_{m, n \in \mathbb{Z}}$  做提升小波变换, 首先是将信号  $x(m, n)_{m, n \in \mathbb{Z}}$  分裂成两个互不相交的子集, 通常将二维信号分为偶数集  $x_e(m, n)$  (偶信号) 和奇数集  $x_o(m, n)$  (奇信号), 即

$$\begin{cases} x_e(m, n) = x(m, 2n) \\ x_o(m, n) = x(m, 2n + 1) \end{cases} \quad (1)$$

预测过程是针对数据间的相关性, 采用一个与数据结构无关的预测算子  $P$ , 然后将  $P$  作用于偶信号上得到奇信号的预测值  $P_e(m, n)$ , 再将该预测值与原奇信号  $x_o(m, n)$  相减得到奇信号的预测误差  $h(m, n)$ , 预测过程的表达式如下

$$h(m, n) = x_o(m, n) - P_e(m, n) \quad (2)$$

在更新部分, 偶信号通过更新值  $U_h(m, n)$  按下式 (3) 被更新产生低通系数  $l(m, n)$ , 即

$$l(m, n) = x_e(m, n) + U_h(m, n) \quad (3)$$

对于本文所提原始分辨率图像经过梅花下采样后生成的两个子图 (两个描述)  $I_{sd1}$  和  $I_{sd2}$ , 如果按照上述传统的提升小波变换做直接分解 (如图 2), 则由于下采样后强行将下采样子图压扁的缘故, 使得相邻像素在位置上存在一个相位的偏差 (在原图上,

$x_{m,n}$  与  $x_{m,n+2}$  是同一列相位的, 而  $x_{m,n+1}$  与它们相差一个相位). 这种相位的偏差使得单个描述中相邻像素间的相关性大大下降, 如果按传统的提升小波变换来做预测和更新, 则会导致在高频子带有更多的高频信号被保持下来, 这就大大降低了单个描述的压缩性能.

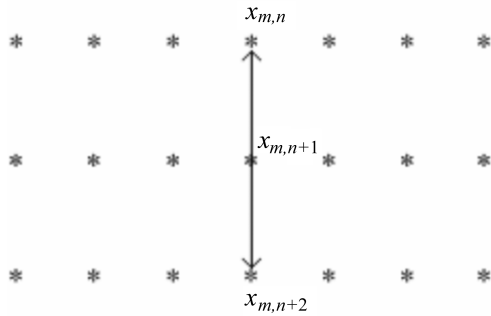


图 2 奇偶信号像素错位图示

Fig. 2 Misalignment between odd and even signals

图 3 给出了下采样后对任意一个描述 (本文方法均以描述  $I_{sd1}$  为例) 进行一次垂直方向提升小波变换后的低频子带和高频子带示意图, 可以看出, 高频子带的高频信息很多, 因此传统提升小波变换很不适用于这种梅花下采样的多描述编码.

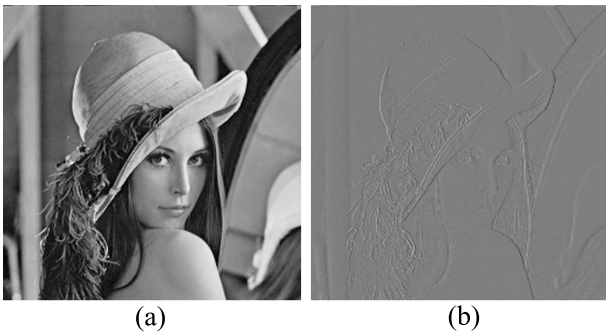


图 3 梅花形下采样子图经一次垂直传统提升小波变换结果 ((a) 低频子带; (b) 高频子带)

Fig. 3 First level lifting-based decomposition results from the traditional lifting technique ((a) Low-pass subband; (b) High-pass subband)

### 3.2 方向提升结构

为了更精准地对下采样后两子图像素进行预测, 本文采用一种方向预测的方法来替代传统提升小波变换中总是沿着水平和垂直方向预测的方法. 如图 4 所示, 首先将子图  $I_{sd1}$  中像素按其原始图像中位置进行放置, 然后分析相邻像素在多个方向上的空间相关性, 选取预测残差最小的方向进行提升小波变换.

从图 4 可以看出, 经过下采样的两描述中的任

意一个描述在做提升小波变换时, 是需要另一描述中的像素点共同参与变换的. 如果在编码端, 我们知道, 任意一个描述也是可以利用另一描述中的像素点做预测和更新的. 但是, 由于用两个独立的信道传输两个描述, 所以在解码端如果只收到一个描述的码流时, 是无法利用另一描述中的像素点做预测和更新的. 只有当两个描述都到达时, 才可以用到相应的另一描述中的像素点来做和编码端相匹配的预测和更新. 而网络的不确定性往往只能使我们得到其中一个描述的信息, 因此, 最简单有效的解决方法是, 采用插值的方法先将单个描述中对应的另一描述中的像素点插值出来, 然后做传统的提升小波变换.

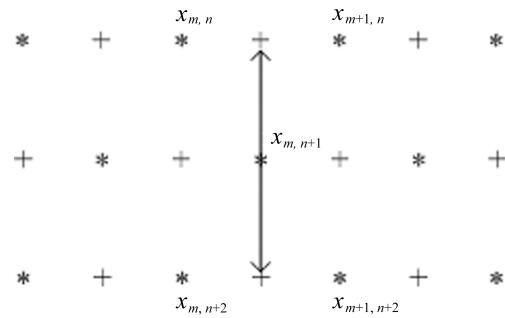


图 4 奇偶信号像素实际位置

Fig. 4 Actual positions of pixels in odd and even signals

插值通常是利用曲线拟合的方法, 通过离散的输入采样点建立一个连续函数, 用这个重建的函数便可以求出任意位置处的函数值. 在本文, 对单个描述进行插值时, 采用经典的 Sinc 插值函数将单个描述中需要用到的另一个描述中的小波系数插值出来.

不仅如此, 还可将单个描述中的半像素点甚至 1/4 像素点插值出来. 这种插值使奇数集的预测值可按最优方向利用偶数集进行预测, 为方向提升小波变换的实现提供了可能. 如图 5 所示, 假设像素在某个方向有很强的相关性 (这里整像素用 “\*” 来标记, 半像素用 “+” 来标记, 1/4 像素用 “^” 来标记), 在单个描述的方向提升小波变换中, 奇相位像素  $x(m, 2n + 1)$  的预测由偶相位像素的线性组合来产生 (以子图  $I_{sd1}$  为例给出以下等式), 即

$$P_e(m, n) = \begin{cases} \sum_i p_i x_e(m + \frac{2+(-1)^{i-1}(dir-2)}{4}, n + i), & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ \sum_i p_i x_e(m + i, n + \frac{2+(-1)^i(dir-6)}{4}), & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \quad (4)$$

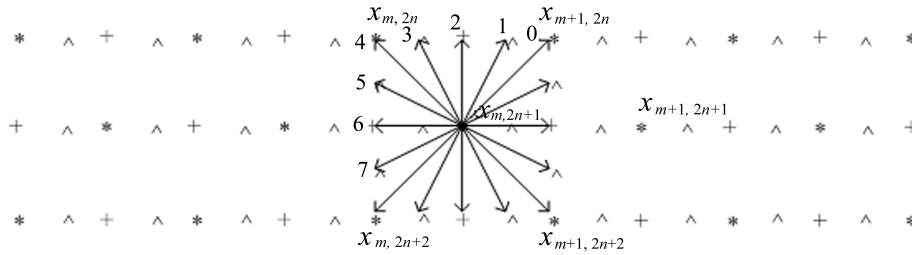


图 5 方向提升小波方向示意图

Fig. 5 The directions in the proposed lifting-based decomposition

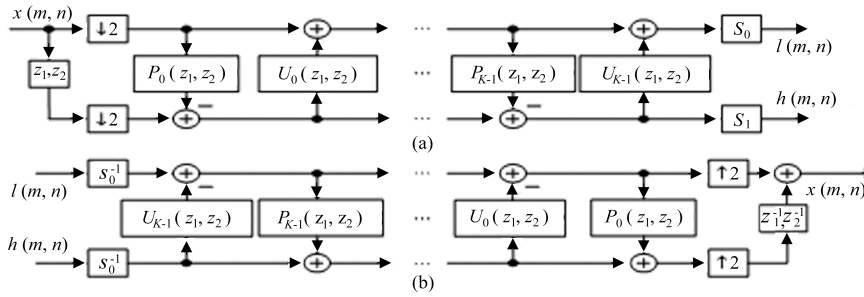


图 6 一维方向提升小波变换框图 ((a) 分解端; (b) 合成端)

Fig. 6 The generic 1D lifting wavelet transform based on directional prediction ((a) Analysis side; (b) Synthesis side)

其中, 权重  $p_i$  由小波滤波器给定, 半像素和  $1/4$  像素点  $x_e$  为 Sinc 插值函数利用相邻整像素点插值出的值. 对应的有限脉冲响应为

$$P(z_1, z_2) = \begin{cases} \sum_{i=a}^b p_i z_1^{\frac{2+(-1)^{i-1}(dir-2)}{4}} z_2^i, & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ \sum_{i=a}^b p_i z_1^i z_2^{\frac{2+(-1)^i(dir-6)}{4}}, & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $dir$  代表方向的指向编号, 具体的方向编号如图 5 中数字标识,  $a$  和  $b$  是预测操作滤波器的有限支撑长度.

从图 5 的方向可知, 整个方向的取值区间为  $[0^\circ, 360^\circ]$ . 这样的方向选取将传统提升小波两次一维的小波变换 (水平和垂直) 用一次一维的方向提升小波变换来取代, 既灵活准确地去除了单个描述中相邻像素的相关性, 又降低了计算复杂度, 并且在一次方向提升小波分解之后, 错位的单个描述正好被分解成对齐的低频子带和低频子带部分.

更新过程按预测过程选取出的方向进行方向更新, 值得注意的是, 这种方向提升小波的结构非常灵活, 更新过程可以选用与预测不同的方向进行. 在本文, 为了节省编码方向的开销, 统一了预测和更新过程的方向, 当然, 对大多数图像来说, 适应于更新过程的方向一般是与预测方向一致的. 因此, 在更新过

程中偶像素按式 (6)(见下页) 进行了更新. 其中, 权重  $u_j$  由小波滤波器给定.

对应的有限脉冲响应式 (7)(见下页). 其中,  $c$  和  $d$  是更新操作滤波器的有限支撑长度.

在图 6 中给出了一维方向提升小波变换的过程框图. 所提算法对应 Harr、5/3 及 9/7 滤波器的有限脉冲响应 FIR 分别在式 (8)~(10) 中给出 (见下页).

利用方向提升小波变换对子图  $I_{sd1}$  进行一次小波变换后低频子带和高频子带如图 7 所示, 与图 2 比较可以很清楚地看出利用该方法后的高频子带中的高频信息减少了很多.

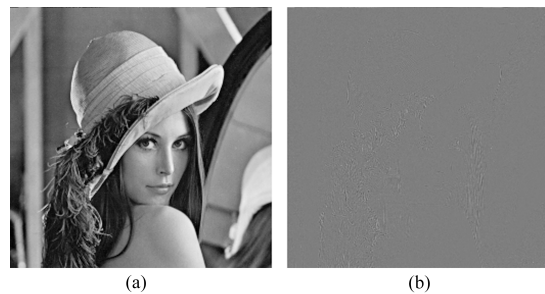


图 7 梅花下采样子图经一次方向提升小波变换结果 ((a) 低频子带; (b) 高频子带)

Fig. 7 First level lifting-based decomposition results from the proposed lifting technique ((a) Low-pass subband; (b) High-pass subband)

$$U_h(m, n) = \begin{cases} \sum_j u_j h(m + \frac{2+(-1)^j(dir-2)}{4}, n + j), & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ \sum_j u_j h(m + j, n + \frac{2+(-1)^{j-1}(dir-6)}{4}), & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \quad (6)$$

$$U(z_1, z_2) = \begin{cases} \sum_{j=c}^d u_j z_1^{\frac{2+(-1)^j(dir-2)}{4}} z_2^j, & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ \sum_{j=c}^d u_j z_1^j z_2^{\frac{2+(-1)^{j-1}(dir-6)}{4}}, & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Harr} : \begin{cases} P_0(z_1, z_2) = \begin{cases} z_1^{(4-dir)/4}, & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ z_2^{(dir-4)/4}, & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ U_0(z_1, z_2) = \begin{cases} z_1^{(4-dir)/4} z_2^{-1}, & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ z_1^{-1} z_2^{(dir-4)/4}, & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ s_0 = s_1 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$5/3 : \begin{cases} P_0(z_1, z_2) = \begin{cases} (z_1^{(4-dir)/4} + z_1^{dir/4} z_2)/2, & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ (z_2^{(dir-4)/4} + z_1 z_2^{(8-dir)/4})/2, & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ U_0(z_1, z_2) = \begin{cases} (z_1^{dir/4} + z_1^{(4-dir)/4} z_2^{-1})/4, & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ (z_2^{(8-dir)/4} + z_1^{-1} z_2^{(dir-4)/4})/4, & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ s_0 = s_1 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$9/7 : \begin{cases} P_0(z_1, z_2) = \begin{cases} 1.586134(z_1^{(4-dir)/4} + z_1^{dir/4} z_2), & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ 1.586134(z_2^{(dir-4)/4} + z_1 z_2^{(8-dir)/4}), & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ U_0(z_1, z_2) = \begin{cases} -0.05298(z_1^{dir/4} + z_1^{(4-dir)/4} z_2^{-1}), & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ -0.05298(z_2^{(8-dir)/4} + z_1^{-1} z_2^{(dir-4)/4}), & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ P_1(z_1, z_2) = \begin{cases} -0.882911(z_1^{(4-dir)/4} + z_1^{dir/4} z_2), & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ -0.882911(z_2^{(dir-4)/4} + z_1 z_2^{(8-dir)/4}), & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ U_1(z_1, z_2) = \begin{cases} 0.443506(z_1^{dir/4} + z_1^{(4-dir)/4} z_2^{-1}), & dir = 0, 1, 2, 3, 4 \\ 0.443506(z_2^{(8-dir)/4} + z_1^{-1} z_2^{(dir-4)/4}), & dir = 5, 6, 7 \end{cases} \\ s_0 = 1.230174; \quad s_1 = 1/s_0 \end{cases} \quad (10)$$

### 3.3 多层小波分解

在基于小波的图像编码技术中, 多层分解结构常被使用. 上述的方向提升结构是应用于第一层的分解, 之后, 一低频子带和一高频子带被产生. 接下来的分解可能有两种方式, 一种是进一步对高、低频子带进行第二次的一维提升小波分解, 然后继续分解低低频子带, 即采用 Mallat 分解方式, 过程如图 8(a) 所示; 另一种是按图 8(b) 的方式进行分解. 从图 5 的方向可知, 方向提升小波分解的方向取值区间在  $[0^\circ, 360^\circ]$ , 这样的方向选取将传统提升小波两次一维的小波变换 (水平和垂直) 用一次一维的方向提升小波变换来取代, 既灵活准确地去除了子图中相邻像素的相关性, 又降低了小波变换的计算复杂度. 而且此时子图中的低频子带与原图进行两次一维 (水平方向和垂直方向) 小波变换后的低低频子带的分辨率正好一致, 变换后子图中像素点正好对齐 (见图 9, 图中用 “●” 表示奇信号, “○” 表示偶信号), 因此本文采用图 8(b) 中分解方式进行小波分解.

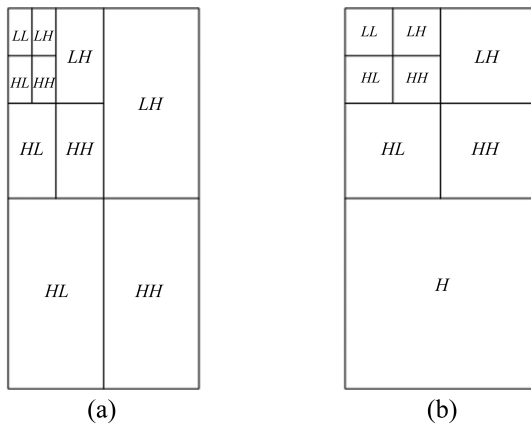


图 8 子图的三层小波分解  
(a) Mallat 分解; (b) 本文所提分解

Fig. 8 The three levels spatial decomposition tree for sub-image ((a) Mallat decomposition; (b) Proposed decomposition)

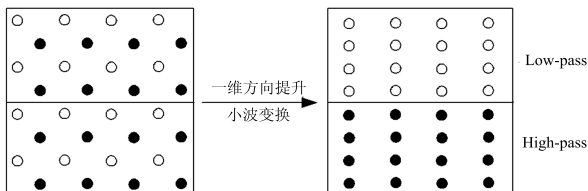


图 9 对子图  $I_{sd1}$  进行一次方向提升小波变换后的低频子带和高频子带

Fig. 9 Low-pass subband and high-pass subband after once directional lifting wavelet transform of the sub-image  $I_{sd1}$

从上述的小波分解结构可以看出, 对第一层分解, 只做了一次 8 方向的分解, 而后续的分解由于像素在位置上已经对齐, 因此仍然采用了传统的 Mallat 分解方式进行分解. 与第一层不同的是每次做一维方向提升小波变换的方向取值范围在  $[45^\circ, 135^\circ]$  与  $[-135^\circ, -45^\circ]$  之间 (如图 10), 共有 9 个方向, 像素精度仍然为 1/4 精度 (整像素仍用 “\*” 来标记, 半像素仍用 “+” 来标记, 1/4 像素仍用 “^” 来标记).

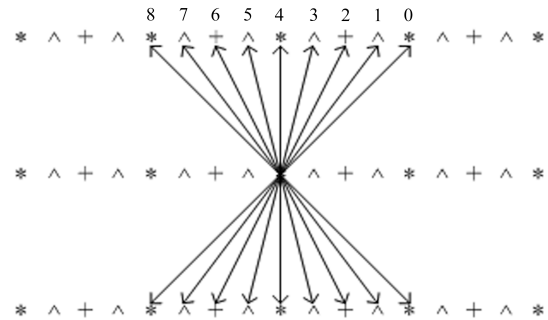


图 10 其它层的提升小波方向示意图

Fig. 10 Directions of the others levels of directional lifting wavelet transform

## 4 编码算法

### 4.1 方向的四叉树分割和率失真优化

随着方向自适应小波变换的产生, 很容易想到的是将子图中纹理相同的部分放在同一块中进行统一的方向编码, 这样可以大大地减少编码方向的比特开销, 但由此也引出了率失真优化问题.

本文采用四叉树分割方式将一幅子图分成大小不同的块, 在同一块中的所有像素采用相同的方向进行小波变换. 如果按图像纹理能够做精细的分割, 则按最优方向做提升小波变换就可以更好地提高图像的编码效率. 当然, 由于四叉树的存在, 一些额外的比特也需传递, 即描述树的信息和四叉树中每个分支的方向. 为了找到编码四叉树和分割质量的平衡点, 利用经典的 BFOS 算法为一棵划分好的四叉树剪枝.

首先, 通过递归的方法将一个块不断分成四个同样大小的子块来创建一棵完整的四叉树  $T$ , 直到子块的大小为一个预先设好的最小块, 本文取该最小块为  $4 \times 4$  块.

对于一棵子树  $S \subset T$ , 定义它的失真度为

$$D(S) = \sum_{l \in S} \sum_{m,n} |h_l(m,n)| \quad (11)$$

这里,  $h_l(m,n)$  为最优方向下的方向预测提升小波变换的高频子带的系数, 下标  $l$  表示子树  $S$  的叶子

节点.

定义子树  $S$  所用码率为

$$R(S) = \sum_{v \in S} r_T(v) + \sum_{l \in S} r_D(v) + \sum_{l \in S} r_C(l) \quad (12)$$

这里,  $r_T(v)$  是编码树节点  $v \in S$  的额外信息比特数, 用一个比特来标识, 如果  $v \in S$  是一个内部节点, 它标志了当前块按四叉树继续进行了分割; 否则,  $v \in S$  为叶子节点, 当前块不再继续分割.  $r_D(v)$  是编码所有叶子节点的最优方向比特数,  $r_C(l)$  是编码叶子节点  $l$  中所有高频子带系数  $h_l(m, n)$  所用的比特. 编码  $h_l(m, n)$  的码率是通过在节点  $v$  的小波系数的信息熵来估计的, 而编码最优方向的比特数是通过预测编码的方法来得到的, 该部分将在本文后续部分介绍.

在树  $T$  的所有被剪枝树中, 一个经过率失真优化的分割树  $S'$  应该是使下式值为最小的树

$$J = D(S) + \lambda R(S) \quad (13)$$

其中,  $\lambda$  是拉格朗日常数, 决定了编码剪枝树  $S'$  以及所有叶子节点  $l \in S$  的高通系数  $h_l(m, n)$  的最小码率. 给定一个  $\lambda$ , 应用 BFOS 最优树剪枝算法可以计算出  $S'$ . 为了满足给定目标码率  $R_0$ , 可以利用迭代的 BFOS 算法, 采用折半查找的方式来得到相应的  $\lambda$  值. 然而实现该过程花费的代价也是相当大的.

为了兼顾高精度度和低比特开销两个方面, 本文利用固定块大小的方法以 JPEG2000 做基础, 实现方向的提升小波变换估计  $\lambda_0$ . 定义块大小固定为  $16 \times 16$ , 即在  $16 \times 16$  块中的每个像素采用相同的方向. 因此, 在做第一层的小波分解时, 每个  $16 \times 16$  块选取所有方向中的预测残差能量最小的方向为该块的预测方向

$$E_{dir} = \sum_{m=m_0}^{m_0+16} \sum_{n=n_0}^{n_0+8} |h(m, n)|, \quad dir = 0, 1, \dots, 7 \quad (14)$$

这里,  $h(m, n)$  是经过一次方向小波变换后的高通系数, 可以通过式 (2) 得到,  $(m_0, n_0)$  是  $h(m, n)$  左上角对应像素的位置,  $dir$  表示所选方向编号. 同样的方法, 我们可以为后续的多层分解选取相应的方向.

我们知道, JPEG2000 中的 EBCOT 技术可以给出一个近似凸的率失真曲线, 上述给定的固定块大小的方向预测小波变换同样采用了 EBCOT 技术来产生率失真曲线. 因此采用这种方法也可以得到子图在目标码率  $R_0$  下的斜率  $\lambda_J(R_0)$ . 然后可以估计出剪枝四叉树在目标码率为  $R_0$  下的斜率

$\lambda_0 = \lambda_J(R_0) - \delta$ , 这里  $\delta$  是一个偏移量. 这种方法很简单, 并且可以较为准确地得到  $\lambda_0$ . 图 11 给出了子图在码率为 0.5bpss、1bpss 以及 2bpss (Bits per source symbol, 简称 bpss) 下, 按上述率失真方法给出的 Lena 四叉树分割图, 可以看出, 随着码率的增加, 四叉树的分割越来越精细.

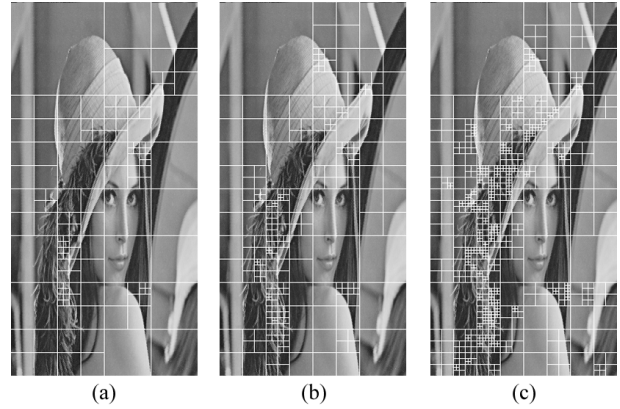


图 11 不同码率下 Lena 图像四叉树分割图

((a) Rate = 0.5bpss; (b) Rate = 1bpss; (c) Rate = 2bpss)  
Fig. 11 The quadtree partition of Lena at different rates  
((a) Rate = 0.5bpss; (b) Rate = 1bpss; (c) Rate = 2bpss)

## 4.2 方向的编码

方向信息的编码在本文方法中也是重要的一部分. 由于子图当前块  $C(n \times n)$  的方向与相邻上块 ( $U$ )、左块 ( $L$ ) 的方向有极大的相关性 (图 12), 所以当前块的方向编码采用预测编码方法进行编码.

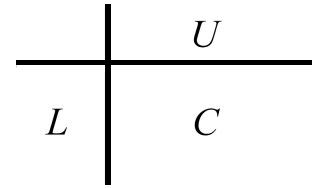


图 12 当前块与相邻块位置

Fig. 12 The relative position of current block and its adjacent blocks

我们定义, 如果上块  $U$  或左块  $L$  不在本图像内, 则当前块  $C$  的方向预测值  $C_{pred}$  为 2 或 4, 即

$$\begin{cases} C_{pred} = 2 & \text{如果是第一层方向提升小波分解} \\ C_{pred} = 4 & \text{其它层方向提升小波分解} \end{cases} \quad (15)$$

否则, 按以下规则进行方向预测

$$C_{pred} = \min(U_{dir}, L_{dir}) \quad (16)$$

为了编码当前块的方向  $C_{dir}$ , 首先一个重要的

用一个比特位标识的参数  $flag_{dir-pred}$  被传递, 取值依据如下式

$$\begin{cases} flag_{dir-pred} = 1 & \text{如果 } C_{dir} = C_{pred} \\ flag_{dir-pred} = 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (17)$$

如果  $flag_{dir-pred} = 1$ , 则不需额外的比特来编码方向  $C_{dir}$ ; 否则, 另外的一个参数  $C_{dircode}$  需用 3 个比特位来传输, 其值由下式给出

$$\begin{cases} C_{dircode} = C_{dir} & \text{如果 } C_{dir} < C_{pred} \\ C_{dircode} = C_{dir} - 1 & \text{否则} \end{cases} \quad (18)$$

此时, 当前块的方向  $C_{dir}$  编码完成.

### 5 解码算法

#### 5.1 边缘信道 (单描述) 的解码和插值

任意单描述经熵解码和逆方向提升小波变换解码后, 由于其仍然为下采样图像, 即低分辨率图像, 因此, 需要对边缘信道解码图像进行原始分辨率的还原. 还原采用插值恢复的方法进行, 但与上述做小波分解时的插值算法的作用和方法不同, 此时利用文献 [10] 中的方法, 通过 Gabor 滤波器对低分辨率图像做纹理分析, 最后根据纹理方向做插值.

#### 5.2 中央信道 (两描述) 的解码和数据融合

当两个描述同时到达时, 可以直接将经过熵解码和逆方向提升小波变换解码的两低分辨率图像  $\hat{I}_{sd1}$  和  $\hat{I}_{sd2}$  按下采样的逆过程进行梅花上采样, 即可直接得到原始分辨率下的图像. 但考虑到两个低分辨率图像  $\hat{I}_{sd1}$  和  $\hat{I}_{sd2}$  经过插值后的图像  $\hat{I}_{s1}$  和  $\hat{I}_{s2}$  中插值出的像素点仍然可以对直接逆提升小波变换解码出的像素点有一定的补偿作用, 因此, 如果给单个描述解码重构出的像素点的值与另一描述插值出的对应位置像素点的值不同的权重, 即可进行两描述的数据融合. 实验证明, 即便是简单的线性融合也比直接梅花上采样效果好. 数据融合过程如下

$$\hat{I}(n, m) = \begin{cases} \alpha_1 \times \hat{I}_{s1}(n, m) + (1 - \alpha_1) \times \hat{I}_{s2}(n, m), & n, m \text{ 奇偶同性} \\ \beta_1 \times \hat{I}_{s1}(n, m) + (1 - \beta_1) \times \hat{I}_{s2}(n, m), & n, m \text{ 奇偶异性} \end{cases} \quad (19)$$

这里,  $n, m$  表示图像像素的行列坐标, 奇偶同性指两数同奇或同偶,  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  是权重因子, 在编码端利用最小均方误差重建原则得到, 并传送到解码端.

因此, 当两个描述同时到达时, 我们先解码出两个低分辨率子图  $\hat{I}_{sd1}$  和  $\hat{I}_{sd2}$ , 然后进行插值撑大, 最后, 利用式 (19) 对两描述进行数据融合, 得到中央信道下的解码图像.

### 6 实验结果

本文方法在现有工业标准 JPEG2000 上实现, 测试图像为  $512 \times 512$  的 Lena 图像. 所有实验结果均选用 9/7 小波, 并采用 5 层小波分解. 第一层的小波分解结构使用  $[0^\circ, 360^\circ]$  的 8 方向预测, 其它各层使用了  $[45^\circ, 135^\circ]$  与  $[-135^\circ, -45^\circ]$  的 1/4 精度 9 方向预测.

在多描述编码方法中, 最新的方法由 Tammam<sup>[11]</sup> 等在 2004 年提出. 为了达到和文献 [11] 相同的中央信噪比, 本文也选用 25% 的冗余度, 并且给出了文献 [11] 中所描述的在冗余度为 25% 时中央和边缘的期望信噪比曲线图. 而文献 [11] 中所提方法实验结果的中央和边缘信道信噪比曲线基本与该期望值曲线重合, 因此, 我们利用该曲线作为参考曲线. 这里, SDC、2SDC (Duplicated SDC) 和期望 (Expected) 信噪比曲线均是根据 JPEG2000 率失真曲线得到.

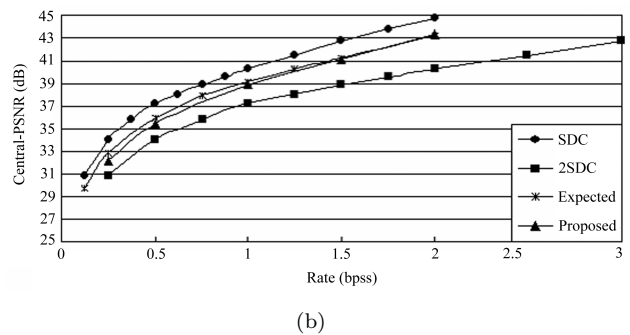
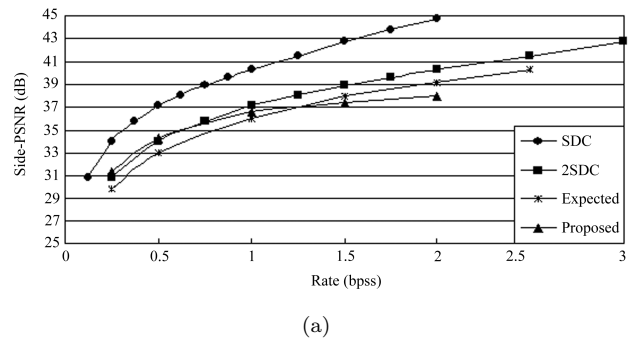


图 13 中央和边缘信噪比曲线图  
((a) 边缘信噪比曲线图; (b) 中央信噪比曲线图)

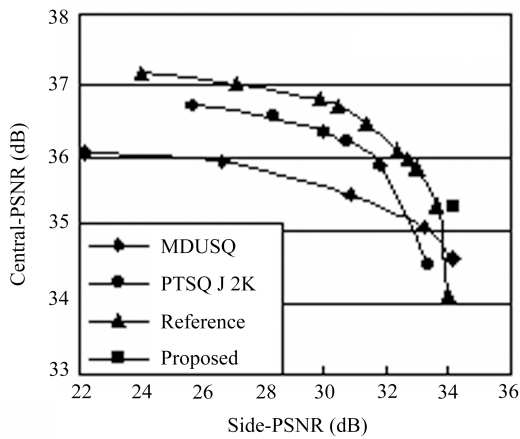
Fig. 13 Central and Side PSNR curves  
((a) Side PSNR curves; (b) Central PSNR curves)

本文所提方法的性能如图 13 所示, 从图中不难

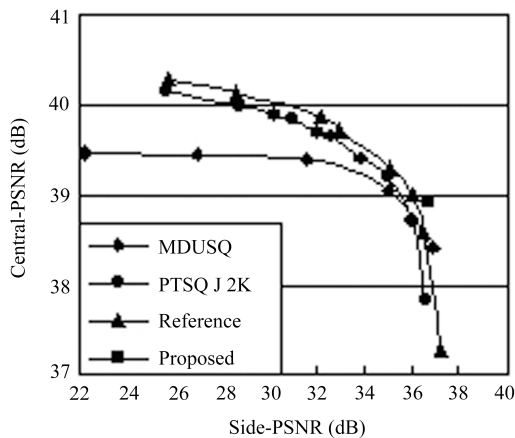


看出, 在相同的中央信噪比下, 本文方法在中低码率下的边缘信噪比均高于文献 [11] 中给定的期望值. 尽管在高端的信噪比有些劣势, 但从高码率的中央信噪比曲线中不难看出, 两个描述  $\hat{I}_{sd1}$  和  $\hat{I}_{sd2}$  的编码质量还是很高的, 但由于低分辨率到高分辨率插值算法的限制, 导致高码率下边缘信道性能的下降.

图 14 给出了文献 [11] 中所提方法 (记为 Reference) 以及与其比较的其它多描述方法 (MDUSQ<sup>[12]</sup> 方法、PTSQ<sup>[13]</sup> 方法等) 在码率为 0.5bpss 与 1bpss 时中央信噪比与边缘信噪比关系图, 从中可以看出本文方法的优势.



(a)



(b)

图 14 在不同码率下中央和边缘信噪比关系图  
(a) Rate=0.5bpss; (b) Rate=1bpss

Fig. 14 Central versus side PSNR at different rates  
(a) Rate=0.5bpss; (b) Rate=1bpss

更为值得关注的是, 在本文方法中, 由于采用了空间下采样方法, 边缘信道解码后采用了插值恢复算法来得到重建的高分辨率图像  $\hat{I}_{s1}$  和  $\hat{I}_{s2}$ , 因此, 图像的视觉质量更为光滑. 而传统的 MDSQ、MDTC

以及文献 [11] 中的方法实现的边缘信道解码图像, 由方法本身决定了其较差的视觉质量. 图 15 给出了本文方法的边缘信道解码图像  $\hat{I}_{s1}$ .



图 15 边缘信道在不同码率下的重建图  
(a) Rate=0.5bpss; (b) Rate=1bpss

Fig. 15 Reconstructed images from one description at different rates ((a) Rate=0.5bpss; (b) Rate=1bpss)

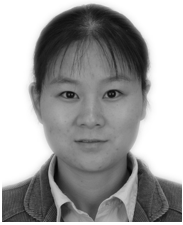
## 7 结论

本文提出一种基于方向提升小波变换的多描述图像编码方法, 该方法通过方向预测, 很好地去除了经空间下采样产生的单个描述中相邻像素间的冗余, 是一种新的实时多描述编码方法. 这种方法既保证了任意描述到达时的图像质量, 又提高了两个描述同时到达时的编码性能, 简单而有效. 因为低分辨率图像到原始高分辨率的图像插值和数据融合部分是码流解码后的独立操作, 所以该方法兼容于现有工业标准. 但本文并没有考虑两个描述之间的相关性, 以及冗余度的可调整性等问题, 因此进一步的深入研究还需进行.

## References

- 1 Goyal V K. Multiple description coding: compressing meets the network. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001, **18**(5): 74~93
- 2 Tom A S, Yeh C L, Chu F. Packet video for cell loss protection using deinterleaving and scrambling. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Toronto, Ontario, IEEE, 1991. 2857~2860
- 3 Wang Y, Orchard M T, Vaishampayan V, Reibman A R. Multiple description coding using pairwise correlating transforms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(3): 351~366
- 4 Goyal V K, Kovacevic J. Generalized multiple description coding with correlating transforms. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, **47**(6): 2199~2224
- 5 Vaishampayan V A. Design of multilevel description scalar quantizers. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993, **39**(3): 821~834
- 6 Kim C S, Lee S U. Multiple description coding of motion fields for robust video technology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, **11**(9): 999~1010

- 7 Wang Y, Lin S N. Error-resilient video coding using multiple description motion compensation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, **12**(6): 438~452
- 8 Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps. *Journal of Fourier Analysis and Application*, 1998, **4**(3): 245~267
- 9 Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 1998, **29**(2): 511~546
- 10 Zhang X J, Wu X L. Image interpolation using texture orientation map and kernel Fisher discriminant. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy, IEEE, 2005. 11~14 and 49~52
- 11 Tillo T, Olmo G. A novel multiple description coding scheme compatible with the JPEG2000 decoder. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, **11**(11): 908~911
- 12 Guionnet T, Guillemot C, Pateux S. Embedded multiple description coding for progressive image transmission over unreliable channels. In: Proceedings of 2001 International Conference on Image Processing. Thessaloniki, Greece, IEEE, 2001. 94~97
- 13 Jiang W, Ortega A. Multiple description coding via polyphase transform and selective quantization. In: Proceedings of Visual Communications and Image Processing '99. Kiyoharu, Aizawa, 1999. 998~1008



**张楠** 北京工业大学计算机学院博士研究生, 主要研究方向为图像/视频编码及其应用.

E-mail: duan@emails.bjut.edu.cn

(**ZHANG Nan** Ph.D. candidate in College of Computer Science and Technology at Beijing University of Technology. Her research interest covers image/video coding and its application. )



**吕岩** 2003年毕业于哈尔滨工业大学, 获博士学位. 现为微软亚洲研究院博士后. 主要研究方向为视频编码和多媒体通信. E-mail: yanlu@microsoft.com

(**LU Yan** Received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2003. Currently, he is a postdoctor at Microsoft Research Asia. His research interest covers video coding and multimedia transmission.)



**吴枫** 1999年毕业于哈尔滨工业大学, 获博士学位. 现为微软亚洲研究院研究员. 主要研究方向为视频编码和多媒体通信. E-mail: fengwu@microsoft.com

(**WU Feng** Received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 1999. Currently, he is a researcher at Microsoft Research Asia.

His research interest covers video coding and multimedia transmission. )



**尹宝才** 1993年毕业于大连理工大学, 获博士学位. 现为北京工业大学计算机学院教授. 主要研究方向为数字多媒体、多功能感知及虚拟现实与计算机图形学. 本文通信作者.

E-mail: ybc@bjut.edu.cn

(**YIN Bao-Cai** Received his Ph.D. degree from Dalian University of Technology in 1993. Currently, he is professor of Beijing University of Technology. His research interest covers digital multimedia, multi-functional perception, virtual reality and computer graphics. Corresponding author of this paper. )