·图形图像处理·

文章编号: 1000-3428(2013)04-0272-04 文献标识码: A

中图分类号: TP391.41

# 基于小波域降采样的低比特率图像压缩算法

李庆忠,谷娜娜,刘晓丽

(中国海洋大学工程学院,山东 青岛 266100)

**摘 要:**针对无线传输背景下低比特率图像压缩存在的模糊和振铃问题,提出一种基于小波域降采样和插值的高效图像压 缩算法。在编码端,对图像进行小波变换,根据各高频子带特点对其进行自适应降采样处理,并采用基于小波树的小波差 分缩减编码算法进行编码。在解码端,采用基于边缘方向的插值方法将解码的高频子带进行放大,对解码重建的图像采用 基于强边缘的自适应滤波算法以消除振铃效应。实验结果表明,与基于空域降采样的图像压缩算法相比,该算法具有较高 的图像解码质量,可有效抑制低比特率下重建图像的模糊和振铃问题。

关键词:降采样;图像压缩;图像插值;低比特率编码;小波变换;振铃效应

# Low Bit-rate Image Compression Algorithm Based on Down-sampling in Wavelet Domain

# LI Qing-zhong, GU Na-na, LIU Xiao-li

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**[Abstract]** To overcome the image blurring and ringing effect problem encountered in low bit-rate coding of images for wireless transmission, an efficient image compression algorithm via adaptive down-sampling and interpolation in wavelet domain is presented. At the encoding end, the image is transformed to wavelet domain, and the high frequency subbands are down-sampled adaptively according to their characteristics. The down-sampled image is coded by the wavelet tree-based Wavelet Difference Reduction(WDR) algorithm. At the decoding end, the decoded high frequency subbands are enlarged by using an edge direction based interpolation method, and the reconstructed image is post processed by a strong edge based adaptive filter to eliminate the ringing effect. Experimental results show that compared with the spatial down-sampling based compression algorithm, the proposed algorithm possesses higher decoding quality of images at low bit-rate, thus effectively alleviates the image blurring and ringing effect.

**[Key words]** down-sampling; image compression; image interpolation; low bit-rate coding; wavelet transform; ringing effect **DOI**: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.04.062

# 1 概述

基于小波变换的图像压缩算法(如 EZW<sup>[1]</sup>、SPIHT<sup>[2]</sup>等), 因其具有良好的时频局部化和变分辨率特性,在图像压缩 领域得到了广泛应用。但在无线传输信道环境下,因受传 输带宽或速率的限制,这些算法的编码效率仍不能满足带 宽要求。典型的应用领域包括利用水声信道传输水下观测 图像、远程无线视频监控等。随着压缩比的提高,基于小 波变换的压缩算法往往会出现图像细节模糊,以及在强边 缘处呈现振铃效应等问题。为解决上述问题,国内外学者 进行了大量研究,代表性方法包括: (1)文献[3]提出一种基于边缘自适应的小波变换低比特率图像压缩算法。在编码端,先检测图像强边缘,根据边缘信息将图像分割成独立数据段分别进行小波变换。该方法在低比特率下可以保持图像轮廓的清晰性,但必须同时将原始图像的边缘信息也进行编码,显然额外增加了编码比特数。

(2)文献[4]将小波域中各子带的系数分成目标和背景两 部分,然后对目标部分进行高比特率编码,而对背景部分 采用低比特率编码。该算法对基于目标的 SAR 图像获得了 较好的压缩比和视觉效果,但是对于一般观测图像,目标 和背景的分割比较困难。

基金项目: 国家 "863" 计划基金资助项目(2006AA09Z237)

**作者简介:** 李庆忠(1963-), 男, 教授、博士生导师, 主研方向: 图像处理, 机器人视觉技术; 谷娜娜、刘晓丽, 硕士研究生 收稿日期: 2012-05-14 修回日期: 2012-07-10 E-mail: lqzhlz@yahoo.com.cn

目前,比较有前景的压缩方法就是基于图像降采样的 压缩方法, 它依赖于最近兴起的 CS 理论<sup>[5]</sup>, 其基本思想是 利用降采样后的图像对原始图像进行紧凑表示是可行的。 依据该理论,目前研究较多的是基于空域图像降采样的编 解码方法<sup>[6]</sup>。该方法的具体框架是:在图像编码之前,先对 原始图像进行降采样处理,然后对降采样图像进行压缩编 码和传输;在解码后再进行插值放大显示处理。其优点是 可以显著提高编码效率,编码计算量小,有利于编码端嵌 入式系统的实时实现,是无线信道图像压缩传输比较理想 的方法。该方法可以对图像平滑区域进行有效插值,但对 边缘、纹理区域则会造成高频损失,从而造成模糊效应。 为了解决该问题, 文献[7]利用分段自回归模型来解决因边 缘插值引起的相位误差。文献[8]提出一种基于边缘的插值 方法,可以有效地对边缘进行插值,但算法较复杂,实时 性较低。文献[9]对图像进行不均匀降采样,把图像分为平 滑区和边缘区,只对平滑区域进行降采样,这样可以有效 减弱因边缘插值引起的模糊问题,但是对图像进行分块编 码不可避免地会引起块效应。

针对空域降采样图像压缩算法存在的上述问题,本文 提出一种基于小波域降采样和插值的低比特率图像压缩算 法。其优点是可以根据各子带对人眼视觉系统(HVS)的重要 性不同,对各子带进行自适应降采样处理,在保持图像整 体性的同时又自适应地丢弃那些对重建图像质量影响较小 的系数。编解码采用基于小波树的 WDR 算法(WTWDR)<sup>[10]</sup>。 解码后的高频子带采用基于边缘保护的插值方法进行放 大,并对强边缘附近区域进行自适应滤波以消除振铃效应。

### 2 小波域自适应降采样编解码算法

在保证图像重建质量的前提下,为有效降低编码比特数,本文提出的编解码算法构成框图如图 1 所示。在编码端,先在小波域内进行自适应降采样处理,采用基于小波树的 WDR 算法进行压缩编码;在解码端,先在小波域进行基于边缘方向的插值放大处理,进行小波反变换重建图像,以及基于强边缘的自适应滤波后处理以得到最终图像。



图1 小波域降采样编解码算法框图

2.1 小波域自适应降采样处理

为了便于在嵌入式系统上实时实现,本文采用 Daub5/3 小波提升变换,其变换公式如下:

正变换:

$$Y(2n+1) = X(2n+1) - \left[\frac{1}{2}(X(2n) + X(2n+2)) + \frac{1}{2}\right]$$
  

$$Y(2n) = X(2n) + \left[\frac{1}{4}(Y(2n-1) + Y(2n+1)) + \frac{1}{2}\right]$$
(1)  
逆変換:

$$X(2n) = Y(2n) - \left[\frac{1}{4}(Y(2n-1) + Y(2n+1)) + \frac{1}{2}\right]$$
  
$$X(2n+1) = Y(2n+1) + \left[\frac{1}{2}(X(2n) + X(2n+2)) + \frac{1}{2}\right] (2)$$

首先对图像进行 4 级小波变换,然后根据各级子带小 波系数的特点对图像进行自适应降采样处理。高尺度子带 比低尺度子带重要;水平和竖直细节子带比对角细节子带 重要。根据上述特点,本文对第1级子带采取了丢弃处理, 对第 2 级子带进行自适应降采样处理,而对低频子带和其 他高频子带不进行处理。下面具体介绍第 2 级子带降采样 处理的方法实现。

因为绝对值大的高频子带小波系数对应于图像的边缘,所以为了保证重要边缘信息不会丢失,对于边缘位置的降采样和插值放大处理,要尽可能沿着边缘方向而避免跨越边缘。由高频子带的特点知:*HL2、LH2、HH2*3个子带分别代表了图像在竖直、水平和对角方向的边缘、细节信息。因此,本文对*HL2*子带(竖直边缘)沿水平方向进行隔行抽取,缩小到原始子带的1/2;对*LH2*子带(水平边缘)沿竖直方向进行隔列抽取,也缩小到原始子带的1/2;对于*HH2*子带(对角边缘),由于它对人类视觉影响相对较小,对其分别进行隔行和隔列抽取,缩小到原始子带的1/4。

图 2 为小波域降采样预处理后的示意图。其中,①代 表 LL4; ②代表 HL4; ③代表 LH4; ④代表 HH4。图中灰 色部分为降采样预处理丢掉的部分,白色区域为预处理后 剩余的待编码系数,可见预处理后图像大小变为原始图像 大小的 3/8。不同于空域图像整体降采样处理,本文提出小 波域的降采样缩小处理,有选择地丢弃对人类视觉影响较 小的系数,并充分保护了重要的边缘信息。

①② ③④ HL3	HL2	
LH3 HH3		HI 1
LH2	HH2	TIL1
LHI		HHI

图 2 小波域降采样预处理示意图

#### 2.2 基于小波树的 WDR 编码方法

对于上述降采样预处理后的待编码部分,本文采用的 压缩编码方法如下:对于集中了图像主要能量的低频子带 LL4,对其单独编码,采用差分脉冲调制(DPCM)预测和熵 编码算法进行无损编码。

对于剩余的高频子带,本文采用基于小波树的 WDR 方 法(WTWDR)进行编解码。该方法把小波零树思想和位置差 降(WDR)编码方法相结合,具有较高的编码效率。首先, 按图 3 所示的方式构造小波树。和一般小波树构造不同的 是,由于二级子带被降采样处理,因此在一棵小波树中, HL2 和 LH2 对应的像素由原来的 16 个变为 8 个, HH2 由 原来的 16 个像素变为 4 个。



#### 图 3 小波树构造示意图

小波树对应子带的扫描顺序规定为 *HL→LH→HH*。具体编码步骤如下:

(1)找出 3 个方向缩小后高频子带中绝对值最大的系数,作为初始阈值 T。

(2) T = T / 2 .

(3)重要系数的 WDR 位置编码。对所有小波树以首尾 相连接的方式进行扫描,编码第一个重要系数的位置,对 剩余重要系数编码它和上一个重要系数的位置差。

(4)重要系数的数值编码。符号编码:用二进制位"1"表示正,"0"表示负。数值编码:若重要系数绝对值在[*T*,1.5*T*]范围内,用"0"表示,重建时大小为1.25*T*;若在[1.5*T*,2*T*]范围内,用"1"表示,重建时数值大小为1.75*T*。

(5)每个重要系数和它重建时的数据相减,得到一个差值,在该重要系数的位置用这个差值代替当前的重要系数。 (6)重复步骤(2)~步骤(5),直到达到规定压缩比。

#### 2.3 基于边缘方向的小波域插值放大

图像小波变换并量化后,各高频子带的小波系数与边 缘的统计关系是:边缘位置的小波系数幅值较大;小波系 数经编码量化后,小系数都量化为0,剩余的都是对应边缘 的大系数。在对2.1节中降采样处理子带放大时,其插值方 法必须符合小波系数的分布特点,即必须沿着边缘方向插 值,以达到保护主要边缘信息的目的。 因此,本文在对 HL2、LH2、HH2 子带插值放大时, 采用了基于边缘方向的插值算法。算法的基本思想是:先 判断待插值点周围是否存在边缘点,若不存在,即周围系 数都为0,则该点属于平滑区,直接数值为0;若存在边缘 点(小波系数幅值较大),则继续判定其边缘方向,并沿着得 到的边缘方向进行插值。

图 4 是第 2 层各子带系数插值示意图,图中灰色部分 是待插值的点,设 *In<sub>k</sub>* 是当前待插值点,*P*<sub>0</sub>~*P*<sub>5</sub> 是其邻近点 的小波系数。



算法具体步骤如下:

(1)*HL*2、*LH*2 子带的插值过程。插值示意图如图 4(a)、 图 4(b)所示,  $In_k$  是当前待插值系数,若其邻近点  $P_0 \sim P_5$ 的 小波系数幅值不全为 0,说明该位置存在边缘。然后通过考 察  $|P_1 - P_4|$ 、  $|P_2 - P_3|$ 、  $|P_0 - P_5|$ 的大小判定边缘方向,绝 对值最小者对应边缘方向。对于 *HL*2 子带,以上三者分别 对应 90°、45°和 135° 3 个方向;对于 *LH*2 子带,三者分别 对应 0°、45°和 135° 3 个方向。

$$In_{k} = (P_{2} + P_{3})/2$$

$$= \frac{1}{2} \left[ P_{0} - P_{5} \right] \left[ \frac{1}{2} M_{0}, M \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} M_{0}, M \right]$$

$$f(P_0 - P_5)$$
 最小,则:

 $In_k = (P_0 + P_5)/2 \tag{5}$ 

若同时存在多个相等的最小值,则:

$$In_k = (P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5)/6$$
(6)

(2) HH2 子带的插值。插值示意图如图 4(c)所示, In<sub>k</sub> 是 当前待插值系数。在进行边缘方向判定时同时考虑 45°和 135°2 个方向。

若
$$|P_1 - P_2|$$
最小,则:  
 $In_k = (P_1 + P_2)/2$  (7)

若
$$|P_0 - P_3|$$
最小,则:

 $In_k = (P_0 + P_3)/2$  (8) 若两者相笔,则·

$$In_k = (P_1 + P_2 + P_0 + P_3)/4$$
(9)

#### 2.4 基于强边缘的自适应滤波后处理

解码重建后的图像,在强边缘附近 5 个像素范围内垂 直边缘方向会产生振铃效应,这是由高频分量的粗量化引 起的,因为量化相当于对图像使用了一个锐截止的低通滤 波器。为去除强边缘附近的振铃效应,本文先用 Canny 算 子检测图像强边缘,再利用 5×5 的滤波模板,只对强边缘 附近(振铃区)的像素进行滤波处理。具体滤波步骤如下:

(1)用 Canny 算子检测图像强边缘,并对边缘检测图进行二值化处理,强边缘像素点用"1"表示,其他像素用"0"表示。Canny 算子具有边缘定位准确、抗干扰能力强、对单边缘有唯一响应等优点,是现有的比较好的边缘检测算子。

(2)对边缘二值图像进行逐点扫描,并判断以该点为中 心周围 5×5 范围内是否有数值为1的点。可分以下3种情况:1)周围没有数值为1的点,则继续扫描;2)该中心点本 身数值就为1,也不进行滤波,因为强边缘点本身不需滤波 处理;3)该中心点数值不为1,且其周围有为1的点,则说 明该中心点是强边缘附近的点,即该点位于振铃区需滤波, 转步骤(3)。

(3)若当前点是需要滤波的点,则返回解码图像该点所 对应的位置进行滤波处理。在解码图像中,该像素周围 5×5 范围内会同时存在 2 类像素:1)和中心像素值相差较大的像 素;2)和中心像素值较为接近的像素。在进行滤波时,为避 免插值误差,只有第 2)类像素参与滤波。首先对这 2 类像 素进行判定,判定方法是:求出中心点与周围像素差值的 绝对值,将差值的绝对值除以中心点的像素值。因为人类 视觉系统对灰度变化的敏感度大致为背景灰度值的 1/10, 所以如果该商值小于等于 0.1,则表示该像素点和中心点灰 度值较为接近,可参与滤波;相反,如果商大于 0.1,则不 参与滤波。

(4)像素类别判定之后开始进行滤波,如图 5 所示,P<sub>13</sub> 是待滤波的中心像素点。图中灰色的点是要参与滤波的点, 白色的像素点不参与滤波。为简化计算,中心点滤波后的 像素值用所有参与滤波的像素点的均值代替。

$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
<i>P</i> <sub>11</sub>	<i>P</i> <sub>12</sub>	<i>P</i> <sub>13</sub>	$P_{14}$	<i>P</i> <sub>15</sub>
<i>P</i> <sub>16</sub>	<i>P</i> <sub>17</sub>	$P_{18}$	$P_{19}$	$P_{20}$
P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>23</sub>	P <sub>24</sub>	P <sub>25</sub>

图5 自适应滤波后处理模板

#### 3 实验结果与分析

本文通过以下 2 组实验测试了本文算法的性能,测试 图像都是大小为 256×256 像素的灰度图像。对于处理后的 图像质量,除了用人眼视觉感知的主观评价外,还利用了 峰值信噪比(PSNR)客观评价指标。

第1组实验是本文算法和 SPIHT 方法以及基于空域降 采样的编码算法在相同压缩比条件下解码图像质量的比 较。图6是压缩比为 0.4 bpp 条件下的实验对比结果。本文 小波域内图像缩小比例相当于空域中图像缩小到原始图像 的 3/8,因此,空域降采样的压缩算法是先对图像进行相同 比例缩小,再用 WTWDR 编码方法进行编解码,最后对解 码图像利用双线性插值放大。图 6(a)、图 6(e)是原始图像, 图 6(b)、图 6(f)是 SPIHT 方法处理结果,图 6(c)、图 6(g) 是空域缩小编码方法处理结果,图 6(d)、图 6(h)是本文算法 处理结果。可见,本文算法的处理结果明显优于空域缩小 编码方法,其细节更丰富,而且 PSNR 值更高。这是因为 空域缩小编码方法在图像缩小时未考虑人类视觉效应,在 对图像缩小的同时也丢掉了对人类视觉影响较大的信息。 而本文在小波域中根据各子带小波系数特点,并充分利用 人类视觉冗余特性,对各子带进行自适应降采样,在缩小 图像的同时尽可能保留图像重要信息,从而有效改善图像 模糊问题。





(e)Barbara (f)PSNR=24.612 dB (g)PSNR=23.532 dB(h)PSNR=24.593 dB

图 6 0.4 bpp 条件下 3 种算法解码图像的对比结果

本文算法和 SPIHT 相比,从 PSNR 值上看两者相差不 大,但是从视觉质量上看本文算法明显优于 SPIHT。这是 因为人眼视觉对于误差的敏感度并不是绝对的,其感知结 果会受到许多因素影响。在高压缩比条件下 SPIHT 会优先 编码整个小波域内系数较大的值,但是根据小波系数的特 点,高尺度子带的小系数可能会比低尺度子带的大系数重 要,水平和竖直方向子带的小系数可能会比对角子带的大 系数重要,所以这种编码方法在低比特率条件下会使图像 背景模糊,尤其是对于细节丰富的图像,解码出来的图像 视觉质量不高。

第 2 组实验是对本文基于强边缘的滤波后处理算法的 性能测试。实验结果如图 7 所示,图 7(a)是原始图像, 图 7(b)是利用 Canny 算子检测出来的强边缘图,图 7(c)是 解码后带有振铃效应的图像,图 7(d)是本文滤波处理之后 的结果。从图中可以看出,经过本文滤波后处理,图像的 振铃效应基本消除,且 PSNR 值有所提高。而且强边缘周 围之外的细节信息经过后处理之后并没有改变,从而避免 了滤波后图像模糊问题。



 (a)Cameraman
 (b)强边缘检测
 (c)PSNR=24.599 dB (d)PSNR=24.637 dB

 图 7 基于强边缘的自适应滤波结果

275

(下转第 279 页)