

一类双正交插值小波的参数化构造及 图像编码应用

刘在德¹⁾ 常晋义¹⁾ 沈钧毅²⁾

¹⁾(常熟理工学院计算机科学与工程学院, 常熟 215500) ²⁾(西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘要 研究采用了提升构造参数化的双正交小波类方法, 构造了一类仅用一个自由参数表达的双正交插值小波, 并推导出了其相关小波滤波器的参数表达式。自由参数为小波的优化设计提供了一个自由度, 以编码增益为优化准则, 构造出一种新的插值小波, 其滤波器系数为二进制分数, 可实现非乘法运算的离散小波变换(DWT)。实验结果表明, 其图像压缩性能超过在小波变换编码领域中应用最为广泛的9/7小波(CDF-9/7), 而且计算复杂度降低了17%以上, 因此, 在压缩性能和计算复杂度两者之间取得了一个较好的平衡。

关键词 双正交小波 插值滤波器 离散小波变换 提升 压缩性能 计算复杂度

中图法分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)04-557-08

Parameterization Construction of A Class of Biorthogonal Interpolating Wavelets and Their Application to Image Coding

LIU Zaide¹⁾, CHANG Jinyi¹⁾, SHEN Junyi²⁾

¹⁾(School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

²⁾(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract This paper depicts how to construct parametric biorthogonal wavelet family via lifting scheme, and gives the complete construction of a new class of parametric biorthogonal interpolating wavelets with one parameter. The exact parameter expressions of their associated interpolating filter banks are also derived. The free parameter provides a degree of freedom to optimize the resulting wavelets, and a previously unpublished interpolating wavelet is obtained with respect to the coding gain criteria, which has binary filter coefficients and can realize a multiplication-free discrete wavelet transform (DWT). Simulations show that the new wavelet has exhibited image compression performance superior to the most widely used 9/7 tap wavelet by Cohen et al. in the field of wavelet transform coding, yet its computational complexity has decreased by more than 17%. This indicates a better tradeoff between compression performance and computational complexity.

Keywords biorthogonal wavelet, interpolating filter, discrete wavelet transforms (DWT), lifting scheme, compression performance, computational complexity

0 引言

双正交小波已被广泛应用于工程和科学计算的各个领域, 尤其在数字图像变换编码领域取得了极

大的成功^[1]。在过去的十几年里, 研究人员构造了许多具有不同特征的双正交小波, 所用的构造方法主要归结为两种: 频域中的谱分解方法^[2]和提升方法^[3-4]。谱分解方法的思路是首先指定基本和对偶小波的消失矩, 然后根据双正交条件(小波滤波器

基金项目: 国家自然科学基金项目(60673087); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(07KJD520005)

收稿日期: 2008-12-05; 改回日期: 2009-01-16

第一作者简介: 刘在德(1977—), 男, 讲师。2006年于西安交通大学获控制科学与工程专业博士学位。主要研究方向为图像处理、小波分析及其在信号处理中的应用, 发表学术论文10余篇。E-mail: lzd.122604@gmail.com; lzd_122604@eslg.edu.cn

精确重构条件)得到一个 Lagrange 半带滤波器,最后因式分解此滤波器得到双正交小波滤波器的系数。与此不同,提升首先选择一个简单的初始小波,通过交替采用预测和更新步骤就可得到一种全新的双正交小波,从而实现一种“无痛、定制”的构造过程。事实上,两种构造方法具有等同的效果,Daubechies 已经证明任意两通道小波的离散小波变换(DWT)都可以分解为有限次的提升步骤^[4]。

许多用于图像编码的小波,如 Cohen 等构造的 9/7 小波(CDF-9/7)^[2]、Winger 等构造的 17/11 小波(W-17/11)^[5]、Villasenor 等构造的 6/10^[6]和 10/18 小波^[7](V-6/10 和 V-10/18),都是基于谱分解方法得到的。其中,CDF-9/7 是 JPEG 2000 标准^[1]中实现嵌入式图像有损编码的第一候选小波。谱分解法的缺点在于:通常 Lagrange 半带滤波器不能够在有理数域内因式分解(平凡分解除外,即一个因子是 1,另一个是它本身),因此得到的小波具有无理滤波器系数,需要用无限的计算精度实现对应的 DWT,这极大地增大了计算复杂度。提升特别适于构造滤波器系数为二进制分数(形如 $k/2^n$, $k, n \in \mathbb{Z}$ 的数)的小波,如 5/3 样条小波,它又以(2, 2)插值小波^[3]而知名,并在 JPEG 2000 标准中得到采用以实现图像的嵌入式有损至无损编码。此类小波可实现非乘法运算的 DWT,计算复杂度很低,但相应的压缩性能也较低。

参数化^[8-14]是一种构造双正交小波的好策略,在构造过程中预置 1-2 个自由参数,可以为小波的最终优化设计提供自由度,从而在压缩性能和计算复杂度二者之间取得一个较好的平衡。文献[10]改进了谱分解法,给出了一种基于 Diophantine 方程理论的参数化构造法。此法避免了因式分解,可构造有理系数的双正交小波。作者采用此法把具有任意阶消失矩的双正交小波简化为仅依赖于一个自由参数的代数表达式,并通过调整自由参数构造了 R-9/7 和 R-6/10 等 30 种有理系数小波。二者的压缩性能分别与 CDF-9/7 和 V-6/10 相当,但仍然与 W-17/11 和 V-10/18 有着较大的差距。文献[13]把参数化构造法推广到 2 个自由参数,构造了 R-17/11 和 R-10/18 等 24 种长滤波器节点的有理系数小波,二者的压缩性能明显优于 CDF-9/7 和 V-6/10,分别与 W-17/11 和 V-10/18 相当;但因为滤波器节点数急剧增加,其计算复杂度虽然低于 W-17/11 和 V-10/18,却远高于 CDF-9/7 和 V-6/10。

因此,构造兼有高压缩性能和低计算复杂度的双正交小波是小波变换编码领域中十分重要的一个问题。

本文研究了利用提升构造参数化的双正交小波类的方法,并采用此法构造了一类仅用一个自由参数表达的 17/11 双正交插值小波,推导出了其相关小波滤波器的参数表达式。接着以编码增益为优化准则,通过调整自由参数,优化得到一种新的插值小波,它不但具有最优的编码增益,而且滤波器系数同样为二进制分数。实验结果表明,其图像压缩性能超过 CDF-9/7(略低于 R-17/11),而且计算复杂度可降低 17% 以上,从而为数字图像的高质量快速编码提供了新的选择。

1 预备知识

提升是一种实现 DWT 的有效方式,它具有梯形结构^[4],这保证了不论采用何种提升滤波器,精确重构条件总能得到满足。图 1 描述了信号前向小波分解的提升步骤(逆向小波重构是简单的反过程,不再给出)。首先把输入信号 $s^{(l-1)}$ (上标 $l-1$ 表示当前的小波分解级数)分裂为奇、偶两部分;然后偶信号与提升滤波器 $P_1(z)$ 做卷积,并把结果从奇信号中减去,通常称这一步骤为对偶提升步骤或者预测;接着新的奇信号与提升滤波器 $U_1(z)$ 做卷积,并把结果加到偶信号上,一般称这一步骤为基本提升步骤或者更新;交替执行预测和更新各 M 次,最后执行一次尺度缩放步骤就可得到新的低通信号 $s^{(l)}$ 和高通信号 $d^{(l)}$ 。再一次,以 $s^{(l)}$ 为输入信号,重复上述步骤,就能完成下一级的提升小波分解。不失一般性,总可以认为提升开始于预测,并包含偶数对提升步骤;其他各种情况不过是 $P_1(z)$ 或者 $U_M(z)$ 为 0 的特例。

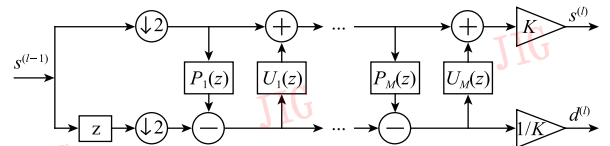


图 1 信号前向小波分解的提升步骤

Fig. 1 Lifting-based forward wavelet decomposition for signals

2 新插值小波类的参数化构造

2.1 基于提升的参数化构造法

用提升实现前向小波分解的实质是对小波的多

相矩阵作初等变换,分解成有限个初等变换阵和一个对角阵之乘积(小波的多相矩阵是一个单位模阵,根据矩阵论,单位模阵一定可分解为有限个初等变换阵之乘积),每一个初等变换阵对应着一次提升步骤而对角阵对应着尺度缩放步骤。假定符号 $\tilde{H}(z)$ 和 $\tilde{G}(z)$ 分别代表双正交小波的对偶低通和高通滤波器,则信号前向小波分解的提升步骤可表示为如下的对偶多相矩阵分解

$$\tilde{P}(z) = \begin{bmatrix} \tilde{H}_e(z) & \tilde{G}_e(z) \\ \tilde{H}_o(z) & \tilde{G}_o(z) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^M \left(\begin{bmatrix} 1 & -P_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ U_i(z) & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\tilde{H}_e(z^2) = \frac{\tilde{H}(z) + \tilde{H}(-z)}{2}, \tilde{H}_o(z^2) = \frac{\tilde{H}(z) - \tilde{H}(-z)}{2z^{-1}}$$

$\tilde{G}_e(z^2)$ 和 $\tilde{G}_o(z^2)$ 类似定义(根据精确重构条件,还有第 2 种分解方式:基本多相矩阵分解^[4])。

显然,采用提升构造双正交小波是上述矩阵分解的逆过程:选定一个非常简单的小波,如 Haar 小波或懒小波(lazy wavelet,其多相矩阵为 2×2 单位阵)作为初始小波,然后交替采用预测和更新步骤(交替乘上三角和下三角单位模阵)来改善对偶小波函数和基本小波函数,最后执行一个尺度缩放步骤,就可得到一个满足特定要求的新小波。

为了改善提升法,可从两方面着手:

1) 选择具有优良性质的特定小波作为初始小波以加快构造进程;

2) 灵活设计提升滤波器 $P_i(z)$ 和 $U_i(z)$ 的结构。比如设计二者为带有数个自由参数的对称多项式,进而根据其他约束条件找出这些自由参数的关系,从而得到参数化的双正交小波类,为用于特定用途的小波的优化设计提供自由度。

2.2 新插值小波类的参数化构造

新插值小波类的构造起点是具有 6 阶消失矩的 Deslauriers-Dubuc 插值滤波器^[15]:

$$H(z) = 2^{-9} [256 + 150(z + z^{-1}) - 25(z^3 + z^{-3}) + 3(z^5 + z^{-5})] \quad (2)$$

$H(z)$ 是同时具有以下 3 个特征的最短滤波器^[3]:

- 1) $H(z)$ 是插值的: $H(z) + H(-z) = 1$;
- 2) $H(z)$ 是对称的: $H(z) = H(z^{-1})$;
- 3) $H(z)$ 具有 6 阶消失矩: $H(z)$ 可分解为

$(z + 2 + z^{-1})^3 Q(z)$ 的形式。

选择 $H(z)$ 为基本低通滤波器,并令对偶低通滤波器 $\tilde{H}(z) = 1$,对应的高通滤波器为

$$G(z) = z^{-1} \tilde{H}(-z^{-1}), \tilde{G}(z) = z^{-1} H(-z^{-1}) \quad (3)$$

则可得到一个平凡的双正交小波。把此小波作为构造新插值小波的初始小波,其对偶多相矩阵为

$$\tilde{P}(z) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{150(1+z^{-1}) - 25(z+z^{-2}) + 3(z^2+z^{-3})}{256} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了改善 $\tilde{H}(z)$,引入一个新的提升滤波器

$$U(z) = \alpha(1+z) + \beta(z^{-1} + z^2) \quad (5)$$

式中, α 和 β 为待定参数。把 $U(z)$ 按式(1)的形式添加到式(4)。则新的对偶多相矩阵为

$$\tilde{P}_{\text{new}}(z) = \tilde{P}(z) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ U(z) & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

把式(6)展开,得到新的对偶低通滤波器为

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{\text{new}}(z) = & \frac{128 - 150\alpha + 25\beta}{128} + \alpha(z + z^{-1}) - \\ & \frac{125\alpha + 153\beta}{256}(z^2 + z^{-2}) + \beta(z^3 + z^{-3}) + \\ & \frac{11\alpha - 75\beta}{128}(z^4 + z^{-4}) - \frac{3\alpha - 25\beta}{256}(z^6 + z^{-6}) - \\ & \frac{3\beta}{256}(z^8 + z^{-8}) \end{aligned} \quad (7)$$

为了确定参数 α 和 β 的关系,须给出新的约束条件。令 $\tilde{H}_{\text{new}}(z)$ 具有 2 阶消失矩,即满足

$$\tilde{H}_{\text{new}}(-1) = 0 \quad (8)$$

从而得到

$$\beta = (1 - 4\alpha) / 4 \quad (9)$$

把式(9)代入式(7),得到对偶低通滤波器的最终表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{\text{new}}(z) = & \frac{537 - 700\alpha}{512} + \alpha(z + z^{-1}) + \\ & \frac{112\alpha - 153}{1\,024}(z^2 + z^{-2}) + \frac{1 - 4\alpha}{4}(z^3 + z^{-3}) + \\ & \frac{344\alpha - 75}{512}(z^4 + z^{-4}) + \frac{25 - 112\alpha}{1\,024}(z^6 + z^{-6}) + \\ & \frac{12\alpha - 3}{1\,024}(z^8 + z^{-8}) \end{aligned} \quad (10)$$

它具有 17 个节点。为简单起见,省略尺度缩放步骤。至此本文构造了一类仅依赖于自由参数 α 的 17/11 双正交插值小波。

2.3 新插值小波类对应 DWT 的提升步骤

假定用符号 $d_0[n]$ 和 $s_0[n]$ 表示输入信号, $d[n]$ 和 $s[n]$ 表示输出信号, 根据式(6)可得前向小波分解的提升步骤为

$$\begin{cases} d[n] = d_0[n] - (1/256)[150(s_0[n] + s_0[n+1]) - \\ 25(s_0[n-1] + s_0[n+2]) + \\ 3(s_0[n-2] + s_0[n+3])] \\ s[n] = s_0[n] + (1/4)[4\alpha(d[n-1] + d[n]) + \\ (1-4\alpha)(d[n-2] + d[n+1])] \end{cases} \quad (11)$$

反向小波重构的提升步骤是上述步骤的逆过程, 不再给出。

3 构造实例

式(10)中的参数 α 可随意赋值, 从而得到不同的插值小波。例如, 当 $\alpha = 1/4$ 时, $\tilde{H}_{new}(z)$ 具有 13 个节点; 而当 $\alpha = 9/32$ 时, $\tilde{H}_{new}(z)$ 具有 4 阶消失矩。这两个插值小波又以 (6, 2) 和 (6, 4) 插值小波^[3] 而知名, 这里仅是改变参数 α 得到的两个特例。为了构造具有最优压缩性能的插值小波以用于图像编码, 需要指定一个衡量小波编码性能的优化准则。

3.1 编码增益

本文采用 Katto 等人提供的编码增益公式来衡量插值小波的压缩性能^[16], 对于双正交小波, 这是一个很有效的评估准则。给定一个 N 子带小波分解系统, 假定第 n 级子带的等效分解和合成滤波器的系数分别用 $\tilde{h}_n(i)$ 和 $h_n(j)$, $n = 1, \dots, N$ 表示; 再假定输入信号可用相关因子为 ρ 的 1 维 Markov 模型表示, 则编码增益可表示为

$$CG(\rho) = \prod_{n=1}^N (A_n B_n)^{-s_n} \quad (12)$$

这里 s_n 是等效的采样率; A_n 是第 n 级输出信号的方差与输入信号方差的比值; 如果假定输出信号的量化误差互不相关, 则 B_n 是等效合成滤波器的系数的

平方和。用公式表示, 则有

$$A_n = \sum_i \sum_j \tilde{h}_n(i) \tilde{h}_n(j) \rho^{|i-j|}, B_n = \sum_i h_n(i)^2$$

3.2 优化的 17/11 插值小波

在实际应用中, 新插值小波有两种使用方法。一种方法是以基本滤波器为合成滤波器, 而对偶滤波器为分解滤波器; 第 2 种方法正好相反。图 2 给出了在两种用法下对应于不同参数 α 的新插值小波的编码增益曲线图。这里相关因子 $\rho = 0.95$, $N = 6$ (即采用 5 级小波分解)。

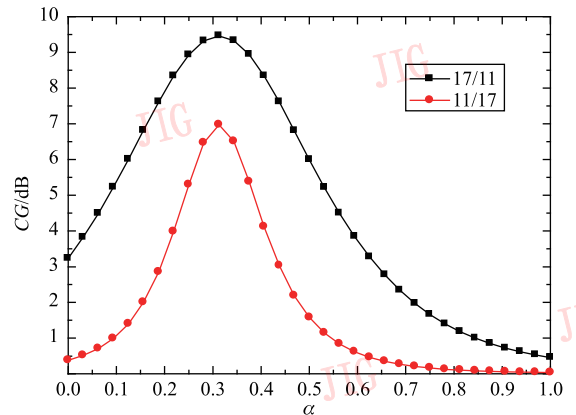


图 2 新插值小波编码增益-自由参数关系曲线图

Fig. 2 Plots of coding gains for the new interpolating wavelet family as a function of the free parameter α

图中 CG 代表编码增益, 单位为 dB ; 图例“17/11”对应着第 1 种使用方法, 而“11/17”对应着第 2 种使用方法。显然, 第 2 种使用方法不可取。对于 17/11 插值小波, 当 $\alpha \in [0.2, 0.4]$ 时, 得到的小波具有较高的编码增益。当 $\alpha = 5/16$ 时, 就可得到一种新的插值小波, 它具有最优的编码增益 (9.46 dB), 记为 L-17/11。而 (6, 2) 和 (6, 4) 插值小波的编码增益分别为 8.93 dB 和 9.32 dB 。表 1 给出了 L-17/11 的分解低通滤波器系数 \tilde{h}_k , 注意它们全都是二进制分数。

图 3 给出了 L-17/11 的尺度函数和小波函数曲线图。合成尺度和小波函数的曲线非常平滑, 这对于产生良好的压缩性能是至关重要的^[10]。

表 1 L-17/11 的分解低通滤波器系数

Tab. 1 Analysis low-pass filter coefficients for L-17/11 wavelet

k	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8
\tilde{h}_k	$\frac{1\ 273}{2\ 048}$	$\frac{5}{16}$	$-\frac{59}{512}$	$-\frac{1}{16}$	$\frac{65}{1\ 024}$	0	$-\frac{5}{512}$	0	$\frac{3}{4\ 096}$

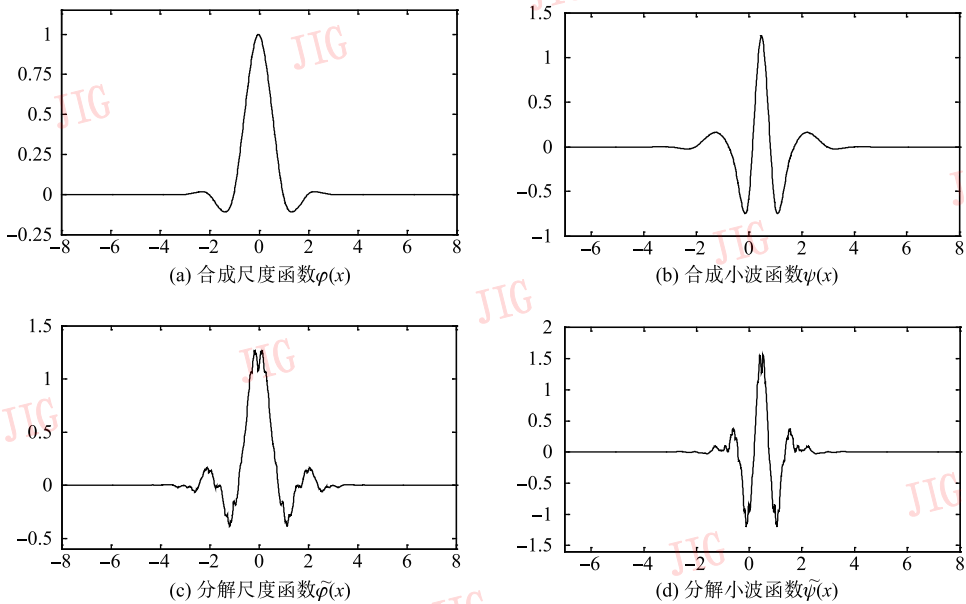


图 3 L-17/11 小波的尺度函数和小波函数曲线图
Fig. 3 Plots of scaling functions and wavelet functions for L-17/11 wavelet

4 性能分析

为验证 L-17/11 小波的图像压缩性能,实验选取 CDF-9/7,R-17/11(表 2 给出了其低通滤波器系数^[12]),和 5/3 小波作为比较对象。选取 CDF-9/7 的原因在于它是小波变换编码领域中应用最为广泛

的一种小波;选取 R-17/11 的原因是其编码性能不但与 W-17/11,R-10/18 和 V-10/18 等 3 种长滤波器节点小波几乎相同,而且计算复杂度最低^[11,13];而 5/3 小波入围的原因在于它是 JPEG 2000 标准采用的计算复杂度最低的小波。性能分析主要考虑计算复杂度、客观压缩性能、以及主观压缩性能 3 个方面。

表 2 R-17/11 小波的低通滤波器系数

Tab. 2 Low-pass filter coefficients for R-17/11 wavelet

k	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8
\tilde{h}_k	152 663 266 240	38 901 133 120	-8 501 133 120	-6 497 133 120	4 977 133 120	973 133 120	-1 483 133 120	-97 133 120	97 106 496
h_k	35/64	77/256	-1/32	-31/512	1/128	5/512	0	0	0

4.1 计算复杂度比较

首先分析 4 种小波变换的计算复杂度,比较单位是采用提升分解一对相邻的像素($s[n], d[n]$)所需要的加、乘和二进制移位操作的数量。表 3 给出了 4 种变换的计算复杂度,其中 CDF-9/7 和 5/3 变换的提升步骤可参见文献[1];R-17/11 变换的

表 3 4 种小波变换的计算复杂度

Tab. 3 Computational complexity of 4 wavelet transforms

小波	L-17/11	R-17/11	CDF-9/7	5/3
+	10 (17)	14	8	4 (4)
×	5 (0)	9	6	2 (0)
二进制移位操作	(8)	-	-	(2)

提升步骤为

$$\begin{cases}
 d[n] = d_0[n] - (5/4)(s_0[n] + s_0[n+1]) \\
 s[n] = s_0[n] + (1/4)(d[n-1] + d[n]) \\
 d[n] = d[n] - (1/4)(s[n] + s[n+1]) \\
 s[n] = s[n] - (4/13)(d[n-1] + d[n]) \\
 d[n] = d[n] + (13/20)(s[n] + s[n+1]) \\
 s[n] = s[n] + (225/512)(d[n-1] + d[n]) - \\
 \quad (485/6\ 656)(d[n-2] + d[n+1]) \\
 s[n] = (4/5)s[n] \\
 d[n] = (5/4)d[n]
 \end{cases} \tag{13}$$

由表 3 可知,5/3 变换所需操作仅是 L-17/11

的 40%，计算复杂度最低；L-17/11 次之；CDF-9/7 排在第 3 位；R-17/11 的计算复杂度最高。尽管 L-17/11 比 CDF-9/7 多执行了 2 次加操作，但乘操作仅需后者的 5/6，因为加操作的时间开销与乘操作相比微不足道，因此，计算复杂度降低近 17% $((1 - 5/6) \times 100\%)$ 。与 R-17/11 相比，L-17/11 的计算复杂度降低近 45% $((1 - 5/9) \times 100\%)$ 。事实上，两种插值小波的滤波器系数为二进制分数，可用移位-加代替乘操作来进一步降低计算复杂度。例如，对于提升系数 $c = 25/256$ ，可写为 $c = (2^4 + 2^3 + 1)/2^8$ ；如果用符号“<<”和“>>”分别表示算术左移和算术右移操作，则整数 x 与它相乘可表示为 $x \times c = ((x \ll 4) + (x \ll 3) + x) \gg 8$ 。表 3 中，括号中的数字表示两种插值小波变换用移位-加实现时所需要的操作数量。尽管移位-加增多了加操作，但加操作所需时间开销特别小，而且移位操作是计算机的最基本操作，其时间开销比加操作还小，因此，

计算复杂度可大大降低，比之 CDF-9/7, L-17/11 计算复杂度的降低肯定超过 17%。另外，移位-加操作特别易于硬件实现，可显著提高 ASIC (application specific integrated circuit) 的可靠性和处理速度。

4.2 压缩性能比较

为了得到公平的比较结果，除了小波变换不同以外，其他测试条件完全相同：对称扩展图像边界，然后作 5 级提升小波变换，得到 6 层金字塔结构的子带系数，最后采用嵌入式编码方法 SPIHT (set partitioning in hierarchical trees)^[17] 编码子带系数。实验以 256 级 (8bpp) 灰度图像 Lena 和 Barbara 为代表，给出了测试结果。选用 Lena 和 Barbara 图像的原因主要是二者分别是“平滑”和纹理图像的典型代表。采用峰值信噪比 (PSNR) (单位: dB) 对重构图像质量进行客观评估；而主观评估则采用简单的人眼视觉感受质量。

4.2.1 客观压缩性能

图 4 和图 5 分别给出了 4 种小波在不同的编码

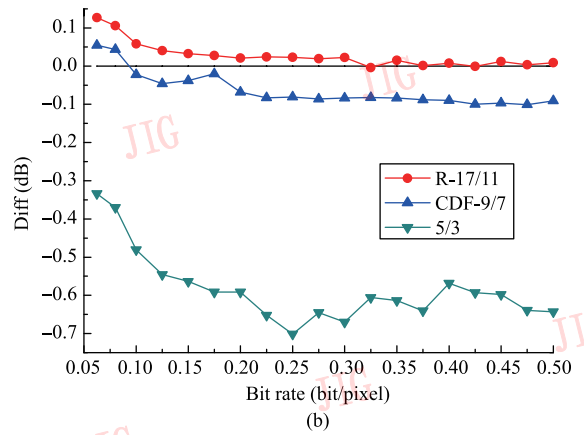
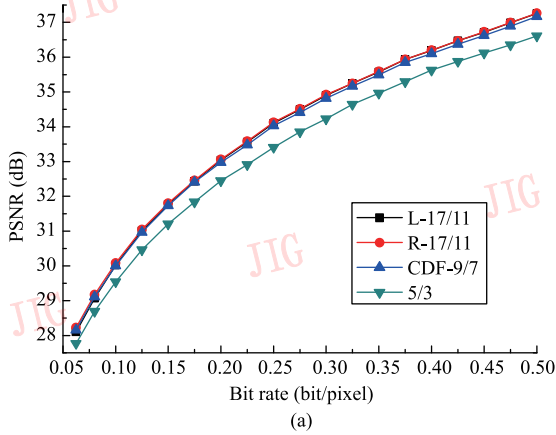


图 4 Lena 重构图像 PSNR 的比较

Fig. 4 PSNR comparison of reconstructed Lena image

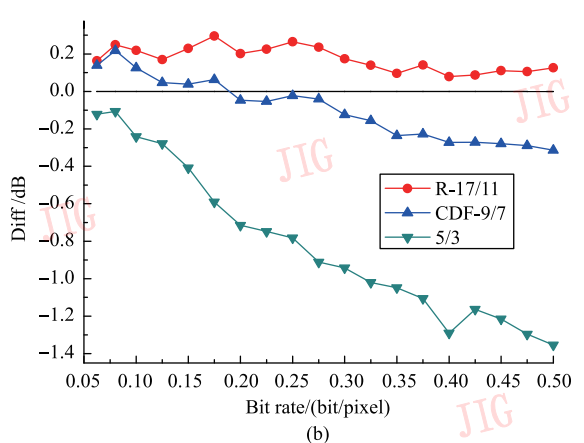
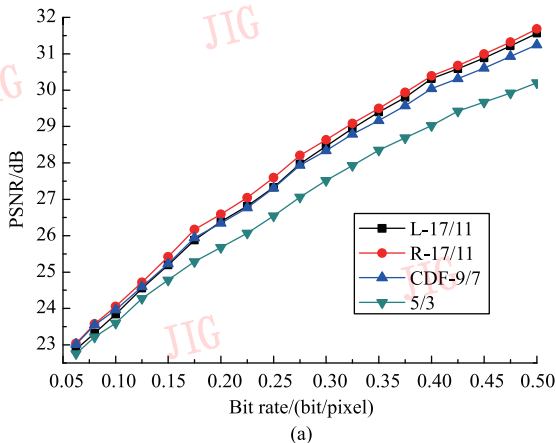


图 5 Barbara 重构图像 PSNR 的比较

Fig. 5 PSNR comparison of reconstructed Barbara image

位率 (bit rate: bit/pixel) 下 Lena 和 Barbara 重构图像 PSNR 的比较, 其中图 4(b), 图 5(b) 是其他 3 种小波相对于 L-17/11 重构图像 PSNR 的差值 (Diff)。表 4 给出了 5 种典型压缩比下两帧位图重构图像

PSNR 的具体值。这 5 种压缩比分别对应着编码位率 0.062 5, 0.08, 0.125, 0.25 和 0.5 bit/pixel。对于每一帧位图, 在每一种压缩比下, 最好的结果已经用粗体显示。

表 4 Lena 和 Barbara 重构图像的 PSNR 值
Tab. 4 PSNR value of reconstructed Lena and Barbara images

小波	Lena					Barbara				
	128:1	100:1	64:1	32:1	16:1	128:1	100:1	64:1	32:1	16:1
L-17/11	28.102	29.067	31.010	34.107	37.254	22.879	23.325	24.552	27.328	31.559
R-17/11	28.229	29.172	31.050	34.130	37.263	23.042	23.574	24.722	27.592	31.685
CDF-9/7	28.157	29.110	30.964	34.027	37.164	23.018	23.543	24.599	27.305	31.245
5/3	27.769	28.697	30.464	33.405	36.611	22.757	23.218	24.273	26.546	30.205

由图 4、图 5 和表 4 可知, R-17/11 的压缩性能最优, L-17/11 次之, CDF-9/7 排在第 3 位, 5/3 最差。R-17/11 的高性能是以高计算复杂度为代价的, 而且与 L-17/11 相比, 优势并不明显。对于 Lena 图像, PSNR 差值大致为 0~0.13 dB, 而且当编码位率大于 0.15 bit/pixel 时, 二者几乎没有区别; 即使对于含丰富纹理的 Barbara 图像, PSNR 差值也没有超过 0.3 dB (最大差值是 0.296 dB, Bit rate 为 0.175 bit/pixel)。比较 L-17/11 和 CDF-9/7 可以发现, 在 Bit rate $\in [0.05, 0.15]$ bit/pixel 的狭窄区间内, CDF-9/7 稍占优势; 而在应用广泛的中、高编码位率区间 $[0.2, 0.5]$ bit/pixel 内, L-17/11 的优势则比较明显: 对于 Lena 图像, L-17/11 取得了大约 0.1 dB 的优势; 而对于 Barbara 图像, 则取得了 0.1~0.3 dB 的性能改善

(最大差值为 0.314, Bit rate 为 0.5 bit/pixel)。5/3 小波重构图像的 PSNR 值比前 3 种小波低很多: 对于 Lena 图像, 差值大约为 0.35~0.6 dB; 对于 Barbara 图像, 差值更加明显, 大约为 0.1~1.1 dB。

4.2.2 主观压缩性能

主观测试主要评估不同小波保持图像纹理的能力。图 6 给出了 4 种小波在压缩比为 32:1 时的 Barbara 重构图像 (为便于比较, 只选取了一部分)。显然, L-17/11 保持纹理的能力要强于 R-17/11 和 CDF-9/7, 推测原因, 它应该和 Deslauriers-Dubuc 插值滤波器具有 3 个优良的特性有一定的关系。对于两个插值小波, 图像主观可视质量的高低与客观 PSNR 值的大小是相对应的: L-17/11 明显地比 5/3 小波保持了更多的桌布和裤子纹理。

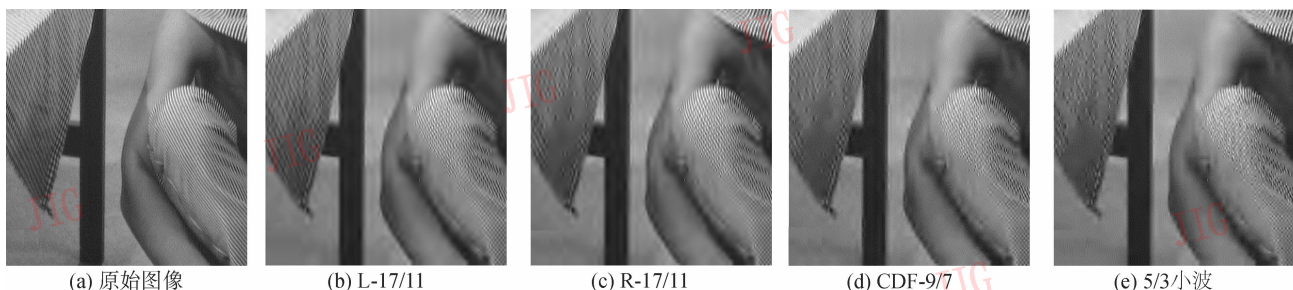


图 6 压缩比为 32:1 时的 Barbara 重构图像

Fig. 6 Reconstructed Barbara images at a compression ratio of 32:1

5 结论

针对目前大多数用于图像编码的小波不能兼有高压缩性能和低计算复杂度的缺点, 本文研究了采用提升构造参数化的双正交小波类的方法, 并采用

此法构造了一类 17/11 双正交插值小波, 推导出了其相关小波滤波器的参数表达式。表达式参数可自由取值, 从而使构造最优的 17/11 插值小波成为可能。根据编码增益理论, 通过调整表达式参数, 本文构造出一种新的 17/11 插值小波, L-17/11, 其滤波器系数是二进制分数, 可实现非乘法运算的 DWT。

实验结果表明,其压缩性能优于 CDF-9/7 小波,且计算复杂度却降低了 17% 以上,在实际应用中完全可以替代 CDF-9/7 小波来实现图像的高压缩比、高质量快速编码。

参考文献 (References)

- [1] ISO/IEC. Information technology-JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System [R]. Technical Report 15444-1 (2nd Edition), ISO/IEC, 2004.
- [2] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. Communications on pure and Applied Mathematics, 1992, 45(5): 485-560.
- [3] Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design of biorthogonal wavelets [J]. Applied Computational and Harmonic Analysis, 1996, 3(2): 186-200.
- [4] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 1998, 4(3): 247-269.
- [5] Winger L L, Venetsanopoulos A N. Biorthogonal nearly coiflet wavelets for image compression [J]. Signal Processing: Image Communication, 2001, 16(9): 859-869.
- [6] Villasenor J D, Belzer B, Liao J. Wavelet filter evaluation for image compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(8): 1053-1060.
- [7] Tsai M J, Villasenor J D, Chen F. Stack-run image coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(5): 519-521.
- [8] Tay D B H. Rationalizing the coefficients of popular biorthogonal wavelet filters [J]. IEEE Transactions on Circuits & System for Video Technology, 2000, 10(6): 998-1005.
- [9] Liu Zaide, Zheng Nanning, Song Yonghong, et al. Design of 9/7 biorthogonal wavelet filter banks with rational coefficients and high performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(8): 848-851. [刘在德, 郑南宁, 宋永红, 等. 高性能、有理系数 9/7 双正交小波滤波器组的设计 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(8): 848-851.]
- [10] Liu Zaide, Zheng Nanning. Parametrization construction of biorthogonal wavelet filter banks for image coding [J]. Signal, Image and Video Processing, 2007, 1(1): 63-76.
- [11] Liu Zaide, Zheng Nanning, Liu Yuehu, et al. Optimization design of biorthogonal wavelets for embedded image coding [J]. IEICE Transactions on Information & Systems, 2007, E90-D(2): 569-578.
- [12] Liu Zaide, Zheng Nanning, Liu Yuehu, et al. Optimization design of 17/11 biorthogonal wavelet and its performance analysis for image compression [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1403-1407. [刘在德, 郑南宁, 刘跃虎, 等. 17/11 双正交小波的优化设计及其对图像压缩性能的分析 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1403-1407.]
- [13] Liu Zaide, Gao Chengxiu. Construction of parametric biorthogonal wavelet filter banks with two parameters for image coding [J]. Signal, Image and Video Processing, 2008, 2(3): 195-206.
- [14] Liu Zaide, Chang Jinyi, Nie Panhong. Optimization design of new Burt-Adelson biorthogonal wavelets [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 3078-3080. [刘在德, 常晋义, 聂盼红. 新 Burt-Adelson 双正交小波的优化设计 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 3078-3080.]
- [15] Deslauriers G, Dubuc S. Symmetric iterative interpolation processes [J]. Constructive Approximation, 1989, 5(1): 49-68.
- [16] Katto J, Yasuda Y. Performance evaluation of subband coding and optimization of [C] //Proceedings of SPIE Symposium on Visual Communications and Image Processing. Boston, USA, [s. n.] 1991, 1605: 95-106.
- [17] Said A, Pearlman W A. A new, fast, efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits & System for Video Technology, 1996, 6(3): 243-250.