

基于重要图中止符的变树结构的零树嵌入式编码算法

罗 强¹, 任庆利², 罗 莉³

(11 二炮工程学院, 陕西西安 710025; 21 西安电子科技大学, 陕西西安 710071; 31 国防科技大学, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文提出了一种易于硬件实现的高速优质的零树嵌入式编码算法. 通过精简重要图结构, 消除结构中的一些冗余、减小一些无用的零树、消除一些不必保留的孤立零点, 来提高编重要图的效率, 同时也提高了压缩效果、加快了编解码速度. 采用提升方案构造双正交 9/7 小波, 不仅进一步提高了小波变换速度, 而且为硬件实现提供了保障. 经模拟实验表明: 此方法加快小波变换速度, 缩短了编、解码时间, 提高了图像压缩比和恢复图像质量.

关键词: 零树; 提升方案; 重要图中止符; 变树结构

中图分类号: TN9191.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 10-1732-04

A Kind of High Speed and High Quality Embedded Zerotree Coding Algorithm for Hardware Implementation

LUO Qiang¹, REN Qingli², LUO Li³

(11 The Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710025 China;

21 Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071 China;

31 National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073 China)

Abstract: In this paper, a kind of high speed and high quality embedded zerotree coding algorithm for hardware implementation was presented, significance map structure was simplified, and some redundance structure was reduced. Some useless zerotrees were diminished and some isolation zeros not to be kept were cleared up so that efficiency of significance map coding rose. It improved image compression performance, reduced coding and decoding execution time. We designed the biorthogonal 9/7 wavelet basis based on lifting scheme so that it not only raised wavelet transform speed, but also ensured hardware implementation. The simulation experimentation showed that this method improved speed of wavelet transform and shortened time of coding and decoding. It raised image compression rate and improved quality of restructure image.

Key words: zerotree; lifting scheme; significance map ceasing sign; variety tree structure

1 引言

零树嵌入式编码是由 Shapiro 在 1993 年首先提出的^[1], 是一种利用小波特性的高性能的图像压缩算法. 它一般是对重要图和重要系数分别编码. 重要图的目的是用来确定重要系数所处子带和方位^[2-4,8]. 针对所存在的/ 结构存在一些冗余 0 的缺点, 本文从两方面入手进行改进: 一是从重要图的零树考虑, 引入重要图中止符; 一是从重要图的孤立零点的消除出发点, 采用变树结构, 可以消除一些不必要保留的孤立零点. 同时, 为了提高小波变换的速度和硬件可实现性, 本文采用提升方案构造双正交 9/7 小波. 实验结果表明: 采用此算法, 可以加快小波变换速度, 缩短编、解码时间、提高图像压缩比和恢复图像质量.

2 基于提升方案构造双正交 9/7 小波

第一代小波的变换都是以 Mallat 算法为基础^[5], 它的分解和合成, 通常被看成常用的双通道滤波器组, 如图 1 所示.

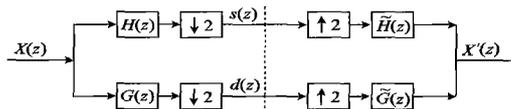


图 1 小波变换和逆变换

信号经小波变换和逆变换后要求能完全重构的充要条件

为:

$$\begin{cases} H(z)H(z) + G(z)G(z) = 2z^{-1} \\ H(z)H(-z) + G(z)G(-z) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

将滤波器的奇次项和偶次项分离开来, 写成其多相位表达式^[5,9]:

$$\begin{cases} H(z) = H_e(z^2) + zH_o(z^2) \\ G(z) = G_e(z^2) + zG_o(z^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $H_e(z^2)$ 表示只含 $H(z)$ 的偶标号系数, $H_o(z^2)$ 表示只含 $H(z)$ 的奇标号系数, 即得到分解端多相位矩阵 H_p 可表示为:

$$H_p(z) = \begin{bmatrix} H_e(z) & H_o(z) \\ G_e(z) & G_o(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

同理合成多端相位矩阵 H_p 可表示为:

$$H_p(z) = \begin{bmatrix} H_e(z) & H_o(z) \\ G_e(z) & G_o(z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

基于提升方案构造的小波, 是第二代小波, 如图 2 所示.

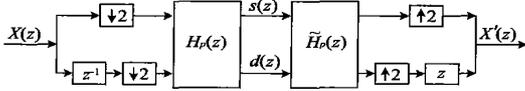


图 2 小波变换和逆变换等效图

由于信号完全重构, 能量完全守恒, 得

$$H_p(z)H_p(z) = I \quad (5)$$

双正交 9/7 小波的分解端多相位矩阵 H_p 可表示为:

$$H_p(z) = \begin{bmatrix} h_0 + h_2(z+z^{-1}) + h_4(z^2+z^{-2}) & h_1(z+1) + h_3(z^2+z^{-1}) \\ g_1(1+z^{-1}) + g_3(z+z^{-1}) & -g_0 - g_2(z+z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

实施提升方案过程, 四阶联乘:

$$H(z) = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D(1+z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ y(1+z^{-1}) & 1 \end{bmatrix} \# \begin{bmatrix} 1 & B(1+z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ A(1+z^{-1}) & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于式(5)和(6)相等, 因此相同的阶数系数相等, 可得到

$$\begin{cases} h_0 = (1 + 2AB + 2AD + 2CD + 6ABCD)F & g_0 = (2BC + 1)/F \\ h_1 = (3BCD + B + D)F & g_1 = -(3ABC + A + C)/F \\ h_2 = (AB + AD + CD + 4ABCD)F & g_2 = BC/F \\ h_3 = BCF & g_3 = -ABC/F \\ h_4 = ABCDF \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} h_0 &= 01852698679, & h_1 &= 01377402856, \\ h_2 &= -01110624404, & h_3 &= -01023849465, \\ h_4 &= 0103782845555 \end{aligned}$$

解之得:

$$A = -115861, B = -010530, C = 018829, D = 014435, K = 111496.$$

双正交 9/7 小波滤波器组分解部分通过 4 个提升环节来完成, 如图 3 所示.

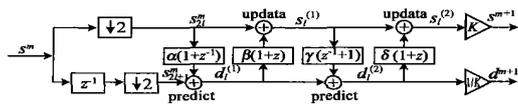


图 3 提升方案构造双正交 9/7 小波滤波器

得到提升算法:

$$\begin{aligned} d^{(1)} &= s_{2l+1}^m + A(s_{2l}^m + s_{2l+2}^m) \\ s_1^{(1)} &= s_{2l}^m + B(d_1^{(1)} + d_1^{(1)}) \\ d^{(2)} &= d_1^{(1)} + C(s_1^{(1)} + s_1^{(1)}) \\ s_1^{(2)} &= s_1^{(1)} + D(d_1^{(2)} + d_1^{(2)}) \\ s_1^{m+1} &= Ks_1^{(2)} \\ d_1^{m+1} &= d_1^{(2)}/K \end{aligned} \quad (9)$$

另外它的逆变换为:

$$\begin{aligned} H_p(z) &= [H_p(z)]^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ A(1+z^{-1}) & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & B(1+z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C(1+z^{-1}) & 1 \end{bmatrix}^{-1} \\ &\# \begin{bmatrix} 1 & D(1+z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -A(1+z^{-1}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -B(1+z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -C(1+z^{-1}) & 1 \end{bmatrix} \\ &\# \begin{bmatrix} 1 & -D(1+z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

提升方案构造双正交 9/7 小波滤波器组特点^[5,6]: 结构简单, 许多乘法变成加法运算, 减小了运算量, 贮存数据量减小, 运算速度加快, 可以硬件实现.

3 重要图中止符

零树嵌入式编码是由对重要图编码和对重要系数编码两部分构成^[7]. 其中, 重要图编码在零树嵌入式编码的总体占到绝大部分; 重要系数的量化编码只占到总体的码字很小部分. 因此, 要提高编码效率, 首先考虑重要图编码结构, 其次才考虑重要系数合适量化编码问题^[8~12].

一幅重要图是由根据某个门限值判断的重要系数、孤立零点和零树组成. 重要系数反映了图像的主要信息, 是主要能量、边缘和纹理等特征的体现者; 孤立零点和零树只是用来确定重要系数的位置的依附品. 优化重要图编码结构, 就是在保证重要系数位置确定的前提下, 减小重要图中的孤立零点和零树的数目.

因为零树嵌入式编码, 它可在一幅重要图的任何时刻结束. 如果在一幅重要图中编完所有的重要系数时, 编码就中止, 这样, 可以减小许多零树数目, 但也可在解码时造成重要图之间内容相混. 为此, 有必要为了区分每幅重要图内容, 引入一个符号)) 重要图中止符, 告诉解码器这幅重要图结束, 下一幅重要图开始了.

用一幅标准测试的 Lena 512 @512 @8 bits 的灰度图像测试, 先基于提升方案进行构造小波分解, 然后进行零树嵌入式编码得到前五幅重要图, 表 1 给出有和没有重要图中止符对比情况.

表 1 重要图的有和没有重要图中止符结构情况

幅数	重要系数 (正、负)	孤立零点	没有重要图中止符		有重要图中止符		
			零树	编码时间 (s)	零树	重要图中止符 编码时间 (s)	
1	22(22, 0)	0	108	0.9	42	1	0.7
2	37(35, 2)	1	142	1.5	52	1	1.2
3	24(10, 14)	14	158	1.9	118	1	1.6
4	75(13, 66)	41	371	2.3	241	1	1.8
5	225(82, 143)	121	1040	2.6	970	1	2.4
总计	383(162, 221)	177	1819	9.2	1525	5	7.7

由表 1 可见, 虽然每幅重要图的重要系数和孤立零点数目一致, 它们在重要图中所处的位置一样, 它们之间的零树相同, 但是每幅重要图中零树的差别是在每幅重要图中最后一个重要系数后面的零树数目. 总之, 有重要图中止符编码比没

有重要图中止符编码小许多. 同理, 在解码时, 有重要图中止符编码法比没有重要图中止符编码花费的时间肯定小.

4 采用变树结构

由于零树和孤立零点, 只起到确定重要图的方位, 在解码时没有任何作用, 且占用编码的 bits 数, 制约着编码效果的提高. 因此, 现在考虑消除一些不必要保留的孤立零点, 以实现优化重要图的编码结构.

在图像信号小波变换后, 由不同频带、位于同一位置的小波系数共同构成了一种树结构. 用数学语言描述的树为:

$$\text{Tree}(i, j, m, n) = \begin{cases} \{(i, j, m, n)\} G \text{Tree}(2i, 2j, m-1, n) \\ G \text{Tree}(2i+1, 2j, m-1, n), & m \times 1 \text{ 且 } n \times LL \\ G \text{Tree}(2i, 2j+1, m-1, n) G \text{Tree}(2i+1, 2j+1, m-1, n) \\ \{(i, j, m, LL)\} G \text{Tree}(i, j, m, LH) \\ G \text{Tree}(i, j, m, HL) \\ G \text{Tree}(i, j, m, HH), & m = M \text{ 且 } n = LL \\ \{(i, j, m, n)\} & m = 1 \end{cases}$$

式中 $\text{Tree}()$ 表示树, i 和 j 表示树根在子图像坐标, m 表示子图像的尺度数 ($m=1$ 即尺度为 1, M 为尺度的最大数), 表示小波图像方向 (LL、HL、LH 和 HH). 小波变换后的图像数据结构可以看成树结构. 因此, 整个小波图像可以看成许多互不交叉的大树构成, 而称这些树为扫描树.

零树嵌入式编码的核心是采用了逐次逼近的量化方法, 逐次逼近量化是逐次使用门限序列, 且为等比缩小数列, 其关系为: $T_i = 0.5 T_{i-1}$. 孤立零点都处在大的尺度小波图像中, 绝大部分的孤立零点在当前的重要图为不重要的, 而在前面某一幅重要图为重要系数.

采用变树结构, 就可以消除一部分的孤立零点. 若扫描树根为重要系数, 就把它消除掉, 这时扫描树变为多棵了, 扫描树根就由它的子树构成; 如果其中某些扫描树根还仍然是重要系数, 这些点继续消除掉, 扫描树继续分裂, 直到所有扫描树根不为重要系数的节点为止. 但是, 采用此方法, 也存在不足: (1) 不是所有的孤立零点都能消除掉; (2) 随着重要图增加而零树数目增大的现象可能出现. 为此, 变树结构中, 我们采用了重要系数细分多区域法.

表 2 用变树结构情况

幅数	重要系数 (正、负)	孤立零点	零树	中止符	编码时间 (s)
1	22(22, 0)	0	42	1	0.70
2	37(35, 2)	1	53	1	1.19
3	24(10, 14)	14	209	1	1.27
4	61(9, 52)	46	411	1	1.45
5	201(71, 130)	142	1022	1	1.89
总计	345(147, 198)	203	1733	5	6.50

同样用前面的图像来实验, 用零树嵌入式编码得到前五幅重要图, 这里也用了重要图中止符. 表 2 给出用变树结构的情况. 显然, 采用这种变树结构, 优化了重要图结构, 减小了孤立零点数目, 增加了零树的数目. 可以看出: 采用变树结构

的重要图中的各项之和大于没有采用变树结构的情况, 特别零树增加速度大于消除孤立零点速度, 但是, 从编码所花费的字节来说, 不管采用 Huffman 编码还是采用算术编码, 不管每幅重要图编码还是总和所编码, 采用变树结构所需要字节比没有采用这结构小多; 虽然采用变树结构, 增加了编码和解码的复杂性, 但从编码花费时间考虑, 采用变树结构, 减小一些编码的时间; 同理, 同样可以减小解码的时间.

5 实验结果

为了检验上述方法的效果, 本文使用三种标准测试图像进行测试, 图像均为 512@512@8bits 的灰度图像, 分别为 Lena、babara 和 goldhill. 其中, 每个像素为这个像素的灰度减去整幅图像的平均灰度, 双正交小波变换的级数为 6. 在图像边界处采用了/ 对折 0 式扩展, 固定压缩比, 测量峰峰值信噪比. 比较没有重要图中止符和有重要图中止符压缩的效果, 采用重要图系数细分上、下半区法, 模拟结果如表 3 所示.

表 3 没有重要图中止符和有重要图中止符的压缩结果

图名	压缩比	没有重要图中止符	有重要图中止符
Lena	8:1	36.27(dB)	37.38 (dB)
	16:1	33.54(dB)	34.75 (dB)
	32:1	31.32(dB)	32.98 (dB)
	64:1	29.09(dB)	30.57 (dB)
Barbara	8:1	34.87(dB)	35.46 (dB)
	16:1	29.45(dB)	30.26 (dB)
	32:1	25.23(dB)	26.38 (dB)
	64:1	23.13(dB)	24.23 (dB)
Goldhill	8:1	35.13(dB)	36.67 (dB)
	16:1	30.24(dB)	31.67 (dB)
	32:1	26.57(dB)	28.14 (dB)
	64:1	24.32(dB)	26.31 (dB)

表 3 可见, 有重要图中止符明显比没有重要图中止符压缩效果好. 继续采用有重要图中止符和重要系数细分多区域法相结合, 比较固定的树结构和变树结构的编码效果, 如表 4 所示.

表 4 固定的树结构和变树结构的压缩结果

图名	压缩比	固定的树结构	变树结构
Lena	8:1	38.65(dB)	40.02 (dB)
	16:1	34.94(dB)	36.73 (dB)
	32:1	32.53(dB)	34.03 (dB)
	64:1	29.30(dB)	31.23 (dB)
Barbara	8:1	34.10(dB)	35.98 (dB)
	16:1	29.23(dB)	31.17 (dB)
	32:1	26.23(dB)	27.87 (dB)
	64:1	23.89(dB)	25.21 (dB)
Goldhill	8:1	37.32(dB)	38.45 (dB)
	16:1	32.51(dB)	33.42 (dB)
	32:1	28.92(dB)	29.62 (dB)
	64:1	26.89(dB)	27.45 (dB)

由此可以发现, 有重要图中止符、变树结构和重要系数细分多区域法相结合的方法, 是在这些改进方法中最佳的方法. 用这种最佳的改进的零树嵌入法与原始的零树嵌入法进行比

较, 本文方法变换采用提升方案构造 9/7 小波基, 而原始零树嵌入法直接用 9/7 小波基, 进行对标准图像 Lena 压缩, 模拟结果如表 5 所示.

表 5 最佳的改进零树嵌入法与原始的零树嵌入法的压缩结果

压缩比	改进零树嵌入法			原始的零树嵌入法		
	PSNR (dB)	编码时间(s)	解码时间(s)	PSNR (dB)	编码时间(s)	解码时间(s)
8:1	40.02	28.23	20.1	39.45	37.52	32.43
16:1	36.73	14.35	12.34	35.94	29.34	26.31
32:1	34.03	8.67	5.31	33.13	21.56	17.37
64:1	31.23	5.46	3.45	30.10	16.27	12.36

由此可以得出, 采用本文最佳的改进方法比原始零树嵌入法在编解码的速度和压缩效果都有提高.

5 结论

本文采用重要图中止符和变树结构方法, 可以不仅减小一些无用的零树, 而且消除一些不必保留的孤立零点, 提高编重要图的效率. 这样, 提高压缩效果, 也加快编解码速度. 采用基于提升方案构造双正交 9/7 小波, 不仅进一步提高小波变换速度, 而且为硬件实现提供保障.

参考文献:

- [1] J M Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. IEEE trans. Signal Procession 1993, 41(12): 3445- 3462.
- [2] A Said, W Pearlman. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical tree[J]. IEEE trans Circuits and systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243- 250.
- [3] A Said, W Pearlman. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression[J]. IEEE trans. Image Processing 1996, 5(9):243- 250.
- [4] M A Losada, G Tohumoglu, D Fraile, et al. Multiiteration wavelet zerotree coding for image compression[J]. IEEE trans. Signal Processing, 2000, 47(3):1281- 1287.

- [5] W Sweldens. The lifting scheme: A custom design construction of biorthogonal wavelets[J]. Appl. Comput. Harmon. Anal. 1996, 3(2): 186- 200.
- [6] I Daubechies, W Sweldens. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. J Fourier Anal. 1998, 4(3): 245- 267.
- [7] B F Wu, C Y Su. Low computation complexity enhanced zerotree coding for waveletbased image compression[J]. IEEE trans. Image communication, 2000, 16(3): 401- 411.
- [8] Z Xiong, K Ramchandran, M T Orchard. Spacefrequency quantization for wavelet image coding[J]. IEEE trans Image processing, 1997, 6(5): 667- 693.
- [9] M Rabbani, R Joshi. An overview of the JPEG 2000 still image compression standard[J]. IEEE trans Image communication, 2002, 17(1): 3 - 48.
- [10] N T Pankaj. Wavelet Image and Compression[M]. 1998, Kluman Academic Publisher, : 123- 155.
- [11] A Averbuch, M Israeli, F Meyer. Speed versus quality in low bitrate still image compression[J]. IEEE trans. Imagecommunication 1999, 15(2): 231- 254.
- [12] K L Chung, S Y Tseng. New progression image transmission based on quadtree and shading approach with resolutioncontrol[J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(4): 1545- 1555.

作者简介:

罗 强 男, 1966 年 11 月出生, 1987 年获二炮工程学院电子工程专业学士学位, 1993 年获西北核技术研究所硕士学位, 2003 年获西安电子科技大学电路与系统专业博士学位, 现为二炮工程学院副教授, 主要研究领域为智能仪器仪表、神经网络、可靠性工程、分形、小波和图像处理等, 发表论文 60 余篇.

任庆利 女, 1968 年 8 月出生, 1996 年获西安交通大学微电子与固态电子学硕士学位, 2003 年获西安交通大学电气工程专业博士学位, 讲师, 主要研究领域为电子材料与器件、神经网络、图像处理等, 发表论文 30 余篇.