

EZW 算法中小波分解层数及扫描次数对图像压缩性能的影响^①

李秀梅, 应广之, 贾中云, 张奇伟

(杭州师范大学 信息科学与工程学院, 杭州 310036)

摘 要: 嵌入式零树小波编码方法(EZW)是目前公认的效率最高的小波图像编码方法之一. EZW 算法中, 不同的小波分解层数能够影响小波变换的时频分辨率和小波系数的变化范围, 从而影响最终的编码效率; 扫描次数的多少直接关系到能被编码的有效小波系数, 从而影响最终的编码增益. 讨论了 EZW 算法中小波分解层数和小波系数的扫描次数对图像压缩性能的影响, 为基于 EZW 算法的小波图像压缩中的选择合适的小波分解层数及扫描次数提供了参考. 通过仿真实验可以看出, 在相同的扫描次数下, 随着小波分解层数的增加, 压缩比增大, 而峰值信噪比随之下降; 而在相同小波分解层数下, 随着扫描次数的增加, 峰值信噪比显著提升, 而压缩比明显下降.

关键词: 图像压缩; 小波变换; EZW 算法; 小波分解

Effects of the Wavelet Decomposition Level and the Times of Scan in the EZW Algorithm

LI Xiu-Mei, YING Guang-Zhi, JIA Zhong-Yun, ZHANG Qi-Wei

(School of Information Science and Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: Embedded zero-tree wavelet encoding (EZW) algorithm is one of the well-known most efficient wavelet image encoding algorithms. In the EZW algorithm, different wavelet decomposition levels will affect the time-frequency resolution of the wavelet as well as the variation of the wavelet coefficients, therefore affecting the final encoding efficiency. Moreover, the times of scan will directly affect the wavelet coefficients to be encoded, therefore affecting the final encoding gain. In this paper, the effects of the wavelet decomposition levels and the times of the scan are investigated and discussed, therefore providing the instruction for the choices of the wavelet decomposition level and the times of scan in the EZW algorithm. From the experiments, we can see that in the same times of scan, with the increase of the wavelet decomposition levels, the image compression ratio (CR) increased accordingly, while the peak signal-to-noise ratio (PSNR) decreases. In the same wavelet decomposition level, with the increase of times of scan, the PSNR increases greatly while the CR decreases.

Key words: image compression; EZW algorithm; wavelet transform; wavelet decomposition; PSNR

图像压缩技术对实现数字图像信息在网络上的快速传输和实时处理发挥着重要作用. 小波变换^[1,2]是实现图像压缩的重要方法, 具有多分辨率分析的特点, 能够表征信号局域特征. 近年来, 许多学者在利用小波变换进行图像压缩方面做了大量工作, 并取得了相当大的成果^[3-7]. 其中, 嵌入式零树小波编码方法 (EZW)^[8]

是目前公认的效率最高的小波图像编码方法之一, 并已成为 JPEG2000 等编码标准的基础. 它不仅能够精确控制编码码率, 而且具有较好的重构质量.

大部分基于 EZW 算法的研究往往比较注重算法本身的改进和提高, 却忽略了在编码过程中不同的小波分解层数和小波系数的扫描次数对压缩结果的影响. 不同

① 基金项目: 国家自然科学基金(61102164); 杭州师范大学科研启动基金(2011QDL021); 杭州师范大学本科生创新能力提升工程项目; 杭州师范大学实验室开放项目; 杭州师范大学挑战杯项目

收稿时间: 2013-01-15; 收到修改稿时间: 2013-02-28

的分解层数将影响变换的时频分辨率和小波系数的变化范围, 从而进一步影响最终的编码增益. 扫描次数是按照精度要求设置的, 对 EZW 算法性能也能产生显著的影响. 研究这两种因素所产生的影响, 不仅有助于更好地发挥 EZW 的编码效率, 而且对以 EZW 为基础的改进算法的高效实用和未来更高效算法的提出均具有一定的参考作用.

本文首先介绍了图像压缩的小波变换以及 EZW 算法原理, 然后针对小波分解层数和小波系数的扫描次数这两个因素, 通过大量的实验数据比较了其对于 EZW 算法性能的影响, 最后给出了实验结果的分析与结论.

1 小波变换用于图像压缩

图像小波分解^[3]通常都是基于二维离散小波变换. 以二层分解为例, 对于一幅原始图像, 先对其行作小波变换, 得到高频分量 H 和低频分量 L, 再分别对 H 和 L 进行列小波变换, 便得到四个子图像, 它们分别是 LL、LH、HL 和 HH. 依此类推, 在第 j 级分解中, 将 LL_{j-1} 按照上述方法分解就得到 LL_j、LH_j、HL_j 和 HH_j, 而且各个频带所表示的边缘轮廓等信息的方向不同, 如表 1 所示.

表 1 小波正交分解后子带图像特点

子图像	行滤波	列滤波	频率特征	图像特征
LL	低通	低通	水平低频垂直低频	平稳成分
LH	低通	高通	水平低频垂直高频	水平边缘
HL	高通	低通	水平高频垂直低频	垂直边缘
HH	高通	高通	水平高频垂直高频	景物拐角

对标准测试图像 lena, 使用 Haar 小波进行二层分解得到的图像如图 1 所示. 从一般频谱角度分析小波变换的特点, 小波变换将信号频谱按倍频分割, 变换结果是原始信号在一系列倍频程划分的频带上的多个高频子带数据和一个低频子带数据. 通过小波变换后图像的能量主要集中在低频子带中, 高频子带所占的能量很小. 对一幅图像而言, 其高频信息主要集中在边缘、轮廓和某些纹理的法线上, 代表了图像的细节变化, 因此可以认为小波变换的各个高频子带是图像中边缘、轮廓纹理等细节信息的体现, 并且各个子带

代表的细节信息的方向不同. 其中 HL 表示了水平方向上的边缘、轮廓和纹理, LH 表示的是垂直方向的边缘、轮廓和纹理, 而对角线方向的边缘等信息则集中体现在 HH 子带中. 小波图像的这一特性表明小波变换具有良好的空间方向选择性, 吻合人眼的视觉特性.



图 1 图像二层小波分解图

2 嵌入式小波零树编码(EZW)算法

嵌入式小波零树编码 EZW(Embedded Zero tree Wavelet)算法^[9]利用小波变换后的子图像具有自相似特点, 并且变换后大部分的能量都集中在几个系数上, 为大幅度的压缩提供了可能, 同时, 不同级间相应位置上的系数之间有较强的相关性. 如果某个较低精度上的一个系数小于某个阈值, 则在下一个较高精度以及更高精度上该系数所对应的后代系数均小于阈值的可能性很大, 可以利用这种可能性来对图像进行编码. 在 EZW 编码算法中, 为了有利于将来的量化和熵编码, 用 4 种不同的字符来描述每一个小波系数的状态:

- 1) 若小波系数及其子孙后代中任何一个的幅值都小于给定的阈值 T, 且该系数的父结点系数的幅值是大于阈值 T 的, 则该小波系数为零树根(T).
- 2) 若小波系数的幅值小于给定的阈值 T, 但它的子孙后代中至少存在一个系数的幅值比这个给定的阈值 T 要大, 则该小波系数为孤立零树根(Z).
- 3) 若小波系数的幅值大于给定的阈值 T, 并且它是一个负数, 则该小波系数为负的重要系数(N).
- 4) 若小波系数的幅值大于给定的阈值 T, 并且它是一个正数, 则该小波系数为正的重要系数(P). 图 2 为编码过程中小波系数符号判断流程图.

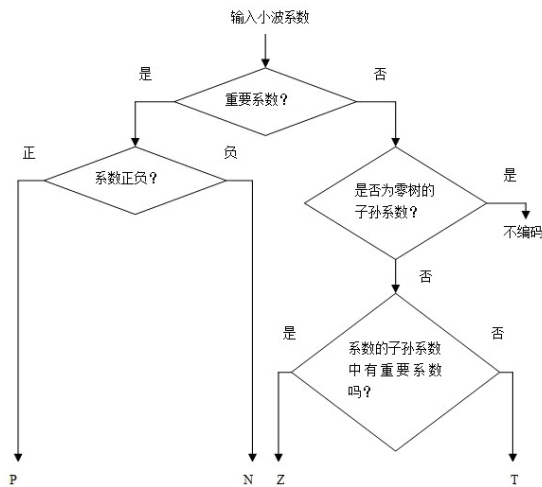


图 2 小波系数符号判断流程图

在编码过程中, 按照某种扫描顺序对各个系数进行扫描、判断以及采用标示符进行标示, 然后将标示符保存下来. 扫描次数可按精度要求进行确定, 与小波分解层数无关. 编码过程中主要需要两个表: 主扫描表和辅扫描表. 主扫描表对应于编码中的不重要的集合或系数, 其输出信息起到了恢复各重要值的空间位置结构的作用; 而辅扫描表是编码的有效信息, 输出为各重要系数的精细扫描值. EZW 算法具体步骤如下:

- 1) 初始化, 选取初始阈值(第一次扫描)

$$T_0 = 2^{\log_2 \max\{|c_{i,j}|\}}$$

其中 $c_{i,j}$ 是 L 级小波分解的分解系数, $|c_{i,j}|$ 为 $c_{i,j}$ 的绝对值. 之后每次扫描的阈值与上一次扫描的阈值之间的关系是:

$$T_i = T_{i-1}/2, \quad i = 1, 2, \dots, L-1$$

- 2) 主扫描, 生成主扫描表, 对小波系数矩阵进行扫描, 若是重要系数, 按照上面的规则进行编码, 并将其幅值加入辅表中, 然后将该系数置为零, 这样当阈值减小时, 该系数不会影响新零树的出现.

- 3) 辅扫描, 对主扫描表进行顺序扫描, 对其中的重要系数进行量化. 在量化前先构造量化器, 量化器的输入间隔为 $[T_i - 1, 2T_i - 1]$, 将其等分为两个量化区间, $[T_i - 1, 3/2T_i - 1]$, $[3/2T_i - 1, 2T_i - 1]$ 若小波系数属于前一区间, 则输出量化符号“0”, 否则输出量化符号“1”. 输出的符号“0”、“1”由辅扫描表记录.

- 4) 将阈值减半, 再进行下一轮的扫描, 逐次逼近

量化, 直到达到压缩要求为止.

在解码时, 解码端采用与编码端一样的扫描顺序, 对接收到的码流进行解码.

3 小波分解层数对 EZW 算法性能的影响

不同的分解层数能够影响小波变换的时频分辨率和小波系数的变化范围, 从而进一步影响最终的编码效率. 因此, 选择合理的分解层数有利于获得较好的编码质量. 在仿真实验中选用标准测试图像 lena (256*256), 小波基采用 Haar 小波基, 扫描次数定为 8 次, 对图像在不同的分解层数时的 EZW 编码效率进行研究.

表 2 小波分解层数对 EZW 算法性能的影响

小波分解层数	MSE	PSNR	BPP	CR	能量百分比
2层	2.082	44.95	5.0950	1.5701	98.45%
3层	8.06	39.07	2.8281	2.8288	97.07%
4层	24.05	34.32	1.5490	5.1653	95.31%
5层	65.56	29.96	0.7813	10.235	92.51%
6层	158.9	26.12	0.3429	23.310	89.67%
7层	326.2	23	0.1361	58.824	88.55%
8层	326.2	23	0.1342	59.524	87.05%

表 2 列出了不同小波分解层数对 EZW 算法性能的影响. 为了对图像的压缩效率进行客观评价, 采用了均方误差 MSE (Mean Square Error)、峰值信噪比 PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)、压缩比 CR (Compression Ratio)、比特每像素 BPP (Bit Per Pixel)、能量百分比等参数进行描述. 令 x_{mn} 和 $\hat{x}_{mn}$ 分别代表图像的第(m, n)个像素的灰度值和图像重建后的第(m, n)个像素的灰度值, M 和 N 表示图像中横向和纵向的像素点个数, 则均方误差 MSE 定义为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{mn} - \hat{x}_{mn})^2 \quad (1)$$

PSNR 定义为:

$$PSNR = 10 \log_{10} (255^2 / MSE) \quad (2)$$

压缩比 CR 和比特每像素 BPP 是衡量数据压缩程度的重要指标. 假设 Ld 为压缩后的代码长度, 压缩比是指原始图像总数据量与压缩后图像总数据量的比值, 定义为:

$$CR = \frac{M \times N \times 8}{Ld} \tag{3}$$

BPP 的定义为

$$BPP = \frac{Ld}{M \times N} \tag{4}$$

此外，能量比是指小波分解后低频系数的能量与原始数据的能量的比值。能量的计算方法为：

$$Energy = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |x_{mn}|^2 \tag{5}$$

从表 2 中的数据可以得到看出：在相同的扫描次数下，压缩比随着小波分解次数的增加而增大，每像素描述的比特率少了，压缩编码比特率也随之下降。同时由于丢失的数据增多，重构图像的均方误差增大，峰值信噪比随之下降。

图 3 所示为不同小波分层的重构图像对比图。从图 3 可以看到，经过 2~5 小波分解得到的重构图像的主观质量较好，与原图像质量差异不太显著，从 6 层小波分解开始，重构图像的主观质量明显下降。因此，在仿真实验中，选取 5 层小波分解是适宜的。该观察结果与表 2 中所给出的客观评价结果是吻合的。



(g) 7 层分解 (h) 8 层分解

图 3 不同小波分层的重构图像

不同小波分层的重构图像的归一化直方图如图 4 所示。从图 4 中可以看到，在同一扫描次数的情况下，随着分解层数的增加，重构图像的数据与原图像相比差异变大，且数据量也随之减少。

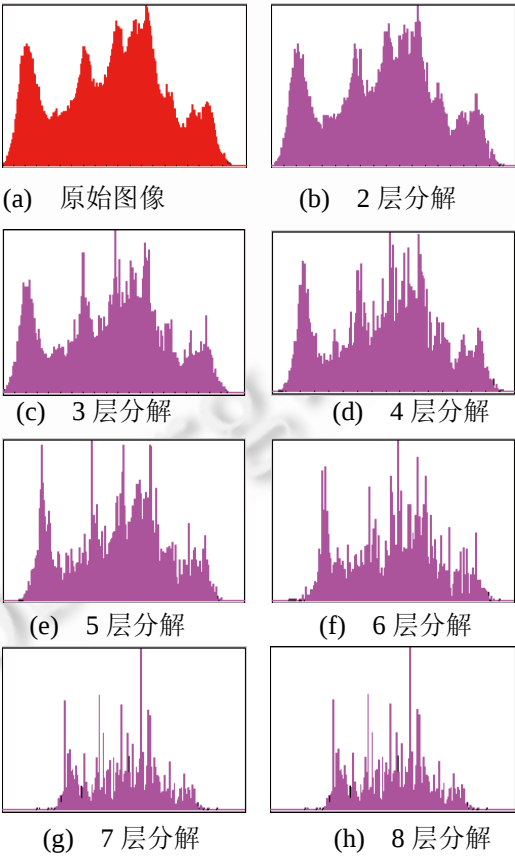


图 4 不同小波分层的重构图像的归一化直方图

4 扫描次数对EZW算法性能的影响

扫描次数的多少直接关系到能被编码的有效的小波系数，从而影响最终的编码增益。在仿真实验中，选用标准测试图像 lena (256*256)，采用 Haar 小波基，小波分解层数选为 8 层，对图像分别在不同扫描次数情况下的 EZW 编码效率进行研究。

表3所示是不同扫描次数对 EZW 算法性能的影响。可以看到: 在相同的小波分解层数下, 随着扫描次数的增加, 压缩比明显下降, 每像素描述的比特多了, 压缩编码比特率上升。同时由于被扫描的小波系数增多, 与原图像相比重构图像丢失的数据量减少, 因此均方误差减少, 峰值信噪比显著提升。

表 3 扫描次数对 EZW 算法性能的影响

扫描次数	MSE	PSNR	BPP	CR
8次	326.2	23	0.1342	59.5238
9次	158.9	26.12	0.3383	23.6407
10次	65.56	29.96	0.7771	10.2987
11次	24.07	34.32	1.5154	5.2798
12次	8.097	39.05	2.6584	3.0093
13次	2.132	44.84	4.3423	1.8423
14次	0.3969	52.14	6.3469	1.2604

(说明: 表2中能量百分比的计算是用低频系数的平方和除以所有系数的平方和。当分层次数为 8 层时, 低频数据相同, 能量百分比也相同, 为 87.05%, 因此表 3 中没有列出能量百分比一栏)

图 5 所示为不同扫描次数的重构图像对比图。从图 5 中可以看到, 在小波分解层数同为 8 层的情况下, 经过 8 次扫描得到的重构图像主观质量较差, 随着扫描次数的增加, 重构图像的质量显著提升。从 11 次扫描次数开始, 重构图像与原图像相差很小, 主观质量高。因此, 在仿真实验中, 选取 9~10 次扫描次数是适宜的, 此时压缩比也较高。该观察结果与表 3 中所给出的客观评价结果是吻合的。



图 5 不同扫描次数的重构图像

不同扫描次数的重构图像的归一化直方图如图 6 所示。从图 6 中可以看到, 在小波分解层数相同的情况下, 随着小波系数的扫描次数的增加, 重构图像的数据与原图像数据的差异越来越小, 图像的质量显著提升, 重构图像越来越接近原图像。

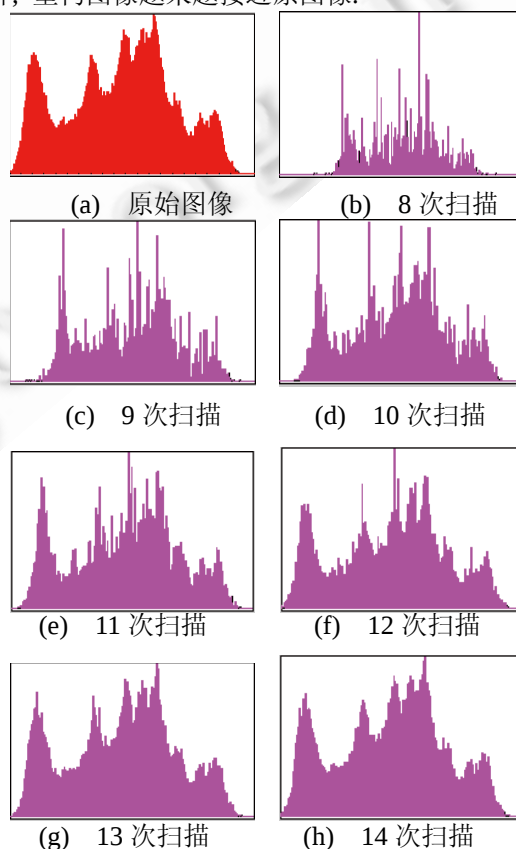


图 6 不同扫描次数的重构图像的归一化直方图

5 实验结果分析及结论

本文为根据实际应用合理选择分解层数与扫描次数以能够更好发挥 EZW 算法的编码效果提供了参考。由实验结果可以得出: (1)小波分解的层数决定了小波变换的最低分辨率。在同样扫描次数情况下, 随着小波分解层数的增加, 有效剔除了大量不重要的系数, 重构图像的压缩比得到了显著提高。但重构后图像的均方误差明显增大, 峰值信噪比相应地下降, 重构图像质量随着分层次数的增加而下降。同时, 随着小波分层次数的增加, 重构图像的数据量相应地减少。(2)扫描次数可以根据精度要求来设定, 它也是影响最终编码增益的一个十分重要的因素。在同样小波分解层数的情况下, 增加扫描次数能够增加被编码的有效小波系数, 可以显著提升重构图像的主观质量, 但同时图像的压缩比会下降。

参考文献

- 1 Mallat G. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989,37(12): 2091-2110.
- 2 郭锦,雷志勇.一种基于小波变换的图像压缩技术与实

现.科学技术与工程,2006,(8):2290-2293.

- 3 何东健,耿楠,张义宽.数字图像处理.第 2 版.西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- 4 Wang P, Dai R, Akyildiz F. A spatial correlation based image compression framework for wireless multimedia sensor networks. IEEE Transactions on Multimedia,2011,13(2):388-401.
- 5 Liu W, Zeng WJ, Dong LN, Yao QM. Efficient compression of encrypted grayscale images. IEEE Transaction on Image Processing, 2010,19(4):1097-1102.
- 6 Zhu SP, Wang ZK. A research on object based system for fractal video compression. Journal of Optoelectronics, Laser, 2010,21(5):725-730.
- 7 毕迎春,王相海.小波基和图像分解层数对不同类型图像 EZW 算法的性能的影响.计算机科学,2006,26(6):232-236.
- 8 Shapiro JM. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(12):3445-3462.
- 9 张德丰.基于嵌入式零树小波变换算法的研究.模糊系统与数学,2004,18(2):121-125.

(上接第 144 页)

共部分配置模型的模板文件,提取里面的内容,统一生成 ICD 文件和装置运行参数文件,并输出回复消息给 WEB 访问。

以上对 XML 相关文件的操作解析,采用了 Xerces-c++库里文档对象模型(DOM)的 XML 解析技术完成。

4 结语

本文介绍了在电能量采集终端(ERTU)装置中利用 Lighttpd、Xerces-c、CGI 等技术实现 Web 配置功能,使得装置运行参数文件和 ICD 模型配置文件在无须外部客户端软件的情况下一并配置完成,可以大大降低工程配置工作量,同时避免了两种配置文件不匹配导致的错误问题,提高了电能量采集终端(ERTU)运行整体可靠性。

参考文献

- 1 章坚民,蒋世挺,金乃正,等.基于 IEC 61850 标准的数字化变电站电能量采集终端的建模与实现.电力系统自动化,2010,34(11):67-71.

- 2 金闪,章坚民,章立宗,等.SCL 语言在变电站装置数字 ERTU 中的应用.机电工程,2010,27(5):56-59.
- 3 卞鹏,潘贞存,高湛军.使用 XML 实现变电站中 IED 的自动识别和远程配置.电力系统自动化,2004,28(10):69-72.
- 4 兰森林,张沛超.基于 SCL 模型的 IED 配置器的设计与实现.继电器,2005,33(12):48-51.
- 5 温东旭,陈延昌,许沛丰,等.IEC61850 配置的工程应用探讨,电力系统保护与控制,2009,37(5):26-30.
- 6 李忠明,曾元静,袁涤非.IEC61850 SCD 文件导入生成嵌入式远动系统装置定义的通用方法.电力自动化设备,2010,30(7):117-120.
- 7 邹晓玉,王浩,吴晓博.IEC61850 标准中 SCL 语言的几个实践应用问题探讨.电力系统自动化,2006,30(15):77-80.
- 8 胡炎,董名垂,韩英铎.电力工业信息安全的思考.电力系统自动化,2002,26(7):1-4.
- 9 de Sousa J, Fitch J. Secure remote access to substation information. 8th IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 2004,2: 697-700.
- 10 <http://www.lighttpd.net>.