

基于 DMWT 和 QIMM 的图像水印算法^①

龚成清

(广东女子职业技术学院 应用设计系, 广州 511450)

摘要: 利用多尺度分析的思想, 对原始图像进行重复行信号预滤波, 把标量小波变换扩展到多小波变换后选取变换出来的低频子带进行水印嵌入. 为了保证水印信息的安全性, 对水印进行加密置乱处理. 然后结合量化索引模数调制(QIMM)的优越性能, 根据水印的信息不同选择不同的子块进行嵌入并实现了水印的盲提取. 实验证明, 算法具有良好的视觉性和鲁棒性, 并大大扩展了水印的容量.

关键词: 多小波变换; 量化索引模数调制; 水印; 鲁棒性

Watermarking Algorithm Based on Discrete Multiwavelets Transform and Quantization Index Modulus Modulation

GONG Cheng-Qing

(Department of Application and Design, Guangdong Women Polytechnic, Guangzhou 511450, China)

Abstract: This paper used the idea of multiscale analysis to perform pre-filtering operation on the image with Repeated Rows. It turned the scalar wavelet into discrete multiwavelets transform and then selected the the low frequency subband. For the security of the watermark, the watermark logo is scrambled with a secret key. With the good performance of Quantization Index Modulus Modulation(QIMM), it embedded the watermark bit to different sub-bands and realized blind watermark extraction. Experiments showed that the algorithm in this paper had good image quality and robustness. It also increased the embedding capacity.

Key words: discrete multiwavelets transform; quantization index modulus modulation; watermark; robustness.

图像水印技术在内容保护、防篡改等领域有着广泛应用. 图像水印技术大体可以分为两类: 空域水印方法和变换域水印方法. 空域水印方法在原图像上直接进行数据运算, 简单易用但鲁棒性较差; 变换域水印方法是将水印信息嵌入图像的变换域中, 有很好的鲁棒性, 是当前研究的一个热点. 离散傅立叶变换(DFT)^[1]、离散余弦变换(DCT)^[2]、Contourlet 变换(CT)^[3]、离散小波变换(DWT)^[4]等都是著名的变换域水印方法.

研究人员对图像水印提出了很多的改进方法, 袁修贵和周振^[5]利用小波分解准则对载体图像进行四层小波分解, 提出一种新的基于 DWT、DCT 和 SVD 的水印算法, 提高了水印的鲁棒性, 但在提取过程中用到了原始水印和原始载体图像的部分信息, 未能实现

盲提取; 龚劬等人^[6]充分利用了图像的边缘纹理特征, 并结合模糊均值聚类技术提出了一种基于邻域与 FCM 的多小波域盲水印算法, 但算法的鲁棒性对嵌入水印的位置及嵌入强度极为敏感; 兰世爽和孙劲光^[7]通过改进的 SIFT 算法对水印信号进行同步, 提出了一种可有效抵抗几何攻击的鲁棒数字水印算法, 但算法的计算复杂度较高; 徐端全和朱光喜^[8]提出了一种 DCT 域量化索引调制(QIM)水印算法, 在确保视觉质量的前提下, 得到良好的水印性能, 但水印的容量受到了限制.

本文把 DWT 扩展到了多小波变换(DMWT), 采用量化索引模数调制(Quantization Index Modulus Modulation, QIMM)^[9]把原始载体数据量化到不同的量

① 收稿时间:2014-01-23;收到修改稿时间:2014-03-10

化区间, 用 QIM 一半的量化步长实现了与 QIM 同等的均方差, 实现了水印嵌入和盲提取, 同时增强了水印的容量, 提高了视觉性和鲁棒性.

1 多小波变换(DMWT)

多小波是小波变换的扩展. 根据多分辨率分析的思想, 用多个尺度函数来表示多个小波, 是一个有力的多标量分析工具. 标量小波有一个尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $w(t)$, 而多小波变换有多个尺度函数和小波函数, 通常使用多维向量函数进行表示. 多小波的多尺度函数 $\Phi(t)$ 表示为:

$$\Phi(t) = [\phi_1(t) \phi_2(t), \dots, \phi_r(t)]^T \quad (1)$$

(1)式满足以下的条件:

$$\Phi(t) = \sum_k C[k] \Phi(2t - k), \quad C[k] \text{ 是 } r \times r \text{ 的矩阵.} \quad (2)$$

与多小波的多尺度函数对应的多小波函数 $W(t)$ 表示为:

$$W(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_r(t)]^T \quad (3)$$

(3)式满足以下的条件:

$$W(t) = \sum_k D[k] W(2t - k), \quad D[k] \text{ 是 } r \times r \text{ 的矩阵.} \quad (4)$$

当 $r=1$ 时, 只有一个尺度函数和一个小波函数, 多小波系统则退化为标量小波系统. 因此, 系数 r 决定了多小波多样性. 一个标量小波不可能同时拥有正交性、对称性和紧支撑. 对于对称信号的扩展, 对称滤波器是必须的; 而正交性可以使变换变得简单, 容易实现; 紧支撑可以对输入函数更好的拟合. 多小波变换突破了单小波变换的限制, 可以同时满足紧支、对称、正交等变换特性^[10]. 多小波变换比标量小波变换在图像处理上有相似的复杂度, 但性能会更好.

2 量化索引模数调制(QIMM)

图像水印算法是鲁棒性和视觉性的折中. 嵌入了水印的图像质量由峰值信噪比(PSNR)来决定, 其计算公式为:

$$PSNR = 10 \log \left[\frac{MN \max(X^2)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X' - X)^2} \right] \quad (5)$$

图像水印的嵌入和提取常用量化的方法的处理,

常用的量化方法有: 抖动调制(DM)^[11]、QIM^[12]、QIMM^[9]. 一般来说, 量化步长越大, 水印的鲁棒性就越好. 但大的步长会影响图像的美观, 从而降低了 PSNR. QIM 的步长取值范围较大, 有时候并不利于图像的处理. 而 QIMM 可以用 QIM 一半的量化步长实现同样的性能, QIMM 比 QIM 和 DM 有更好的鲁棒性和视觉性^[9]. QIMM 常用的两种方法是:

方法 1: 用量化步长 Δ 去除宿主信号, 并取最接近的整数. 然后模 2 得到 0 或 1 的数据. 如果这些数据与水印的比特值相等, 则重构值就是量化后的宿主信号. 否则, 误差是 -1 或 1.

方法 2: 宿主信号对量化步长 Δ 取模, 抽取出信号的残余. 残余的信号被加到最接近的宿主信号来确定水印比特值是 1 还是 0. 信号的误差是 $-\Delta/4$ 或 $\Delta/4$.

本文使用方法 2 进行处理, 设原始图片为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 水印图像比特值 $y_i \in \{0, 1\}$, Δ 为量化步长. 则 QIMM 嵌入水印处理过程如下: 令 $p_1 = \text{mod}(x_1, \Delta)$, 则

$$x'_i = \begin{cases} x_i - p_1 + \alpha & , y_i = 0 \\ x_i - p_1 + \beta & , y_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\Delta}{8} & p_1 < \frac{3\Delta}{8} \\ \frac{5\Delta}{8} & \frac{3\Delta}{8} \leq p_1 < \frac{7\Delta}{8} \\ \frac{9\Delta}{8} & \frac{7\Delta}{8} \leq p_1 < \Delta \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} -\frac{\Delta}{8} & p_1 < \frac{\Delta}{8} \\ \frac{3\Delta}{8} & \frac{\Delta}{8} \leq p_1 < \frac{5\Delta}{8} \\ \frac{7\Delta}{8} & \frac{5\Delta}{8} \leq p_1 < \Delta \end{cases} \quad (8)$$

经过 QIMM 嵌入处理后含水印的图像为 $X' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$. 水印的提取过程为: 令 $p_2 = \text{mod}(x'_i, \Delta)$, 则

$$y_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq p_2 < \frac{\Delta}{4} \quad \text{或者} \quad \frac{\Delta}{2} \leq p_2 < \frac{3\Delta}{4} \\ 1 & \frac{\Delta}{4} \leq p_2 < \frac{\Delta}{2} \quad \text{或者} \quad \frac{3\Delta}{4} \leq p_2 < \Delta \end{cases} \quad (9)$$

3 QIMM-DMWT的图像水印算法

3.1 原始图像预滤波

在进行DMWT之前, 必须对原始图片进行预滤波

处理来将标量形式的输入信号值转化为所需的向量形式。通常，有两种预滤波方法：矩阵预滤波与重复信号预滤波(RR)。重复信号预滤波由于重复采样，将使原始输入信号的数据量增大2倍，会带来大量冗余信息。而数据的冗余可以增加水印嵌入的能力，因此本文采用重复信号预滤波的方式对原始图像进行预滤波处理。RR处理公式如下：

$$C_{0,k} = \sum_{n=0}^{L-1} a_n f_{n+k} \quad (10)$$

其中， f_n 是原始的输入信号，L是预滤波的长度， a_n 是 $r \times 1$ 的向量。

3.2 水印的嵌入

GHM多小波^[13]具有2个尺度函数和2个小波函数，它既保持了标量小波所具有的良好时域和频域局部化特征，又具有正交性、紧支撑、高阶消失矩和对称性等显著特点。GHM多小波具有很好的通用性和精确性。本文在GHM多小波分解出来的低频域上对水印进行了嵌入。GHM低通滤波器系数矩阵为：

$$H_0 = \begin{bmatrix} 3 & 4\sqrt{2} \\ 5 & 5 \\ 1 & -3 \\ -10\sqrt{2} & -10 \end{bmatrix} \quad H_1 = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 5 & 0 \\ 9 & 1 \\ 10\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 9 & 3 \\ 10\sqrt{2} & -10 \end{bmatrix} \quad H_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 10 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

一般而言，1级GHM多小波分解可以得到16个子带图像，如图1所示。其中4个低通滤波带会进一步分解为16个子带。设k是分解的级数，则分解矩阵的数量等于 $4+12k$ ，如图2所示。

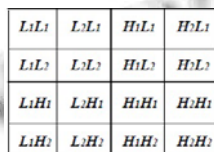
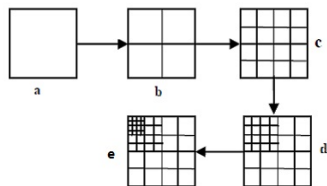


图1 1级GHM多小波分解



(a)原始图像(b)预滤波(c)1级分解(d)2级分解(e)3级分解

图2 3级分解过程

水印嵌入的具体算法如下：

- (a)设原始图像大小为 $N \times N$ ，使用RR对图像进行前滤波产生两个输入流。图像大小变为 $2N \times 2N$ 。
- (b)使用GHM多小波变换对预处理后的图像进行K级分解。由于低通滤波带子带保存了图片的大部分能量，所以把水印信息嵌入到第k级的低通滤波带子带中。
- (c)对水印图像进行置乱和加密处理。只有得到正确密钥，才可以还原原始的水印图像。
- (d)使用QIMM的方法进行分块处理，得到多小波系数，根据公式(6)、(7)、(8)选择对应的块嵌入水印信息 w_i
- (e)对修改后的图像子带进行GHM逆变换。
- (f)使用RR对图像进行后滤波处理，完成水印的嵌入。

算法的流程图如图3所示：

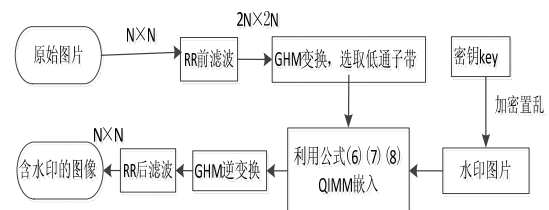


图3 水印嵌入算法流程图

3.3 水印的提取

水印的提取是水印嵌入的逆过程。本文对水印实现了盲提取，具体算法如下：

- (a)对大小为 $N \times N$ 的含水印图像进行RR预滤波。
- (b)对预滤波后的图像进行GHM变换，对图像进行K级分解。
- (c)对分解后的图像进行QIMM处理，利用公式(9)，从选择块中的多小波系数分离 w_i 。
- (d)用密钥对获得的数据进行解码。
- (e)检测出水印后，使用BER校验水印的正确性。

算法流程图如图4所示：

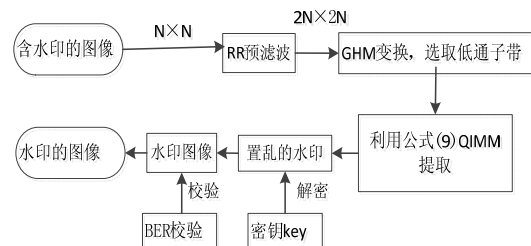


图4 水印提取算法流程图

4 实验结果

本文在windows xp环境下,使用matlab对算法进行了验证. 机器配置为Intel Core i7的CPU, 4G的内存, 使用512×512的lena的灰度图像为原始图像, 对3种不同尺寸的水印图片实现了了嵌入和提取. GHM的分解级数 $k=3$, QIMM量化步长 $\Delta=160$, 水印图像采用arnold置乱. 实验结果如图5所示:



图5 实验效果图

实验成功地对水印的图片进行了嵌入和提取, 提取的水印图片与原始的水印图片相似度为1. 从实验的结果看出, 嵌入水印后的图片与原始图片从肉眼上无法分辨差别, 水印的嵌入算法具有良好的视觉性.

为了进一步验证算法的鲁棒性, 对图5(c)含水印的图片加入滤波噪声、缩放、旋转、JPEG压缩、剪切和平移的攻击后进行水印提取和检测误码率, 并与文献[4]和文献[6]中的算法进行了比较, 实验结果表明, 本文的算法面对各种攻击具有较低的误码率, 有很好的鲁棒性. 实验结果如表1和图6所示:

表1 各种算法抵抗攻击比较

攻击类型	文献[4]	文献[6]	本文算法
3×3中值滤波	0.1528	0.0538	0.0082
高斯噪声	0.0981	0.0624	0.0103
50%缩放	0.0362	0.0359	0.0187
150%缩放	0.0008	0	0
150旋转	0.0084	0	0
300旋转	0.0236	0.0053	0.0028
JPEG压缩 (QF=50)	0.0297	0.0243	0
JPEG压缩 (QF=80)	0.0013	0	0
25%剪切	0.0136	0.0862	0.0028
50%剪切	0.3032	0.2346	0.1509
向左平移10像素	0	0	0
向下平移30像素	0	0	0

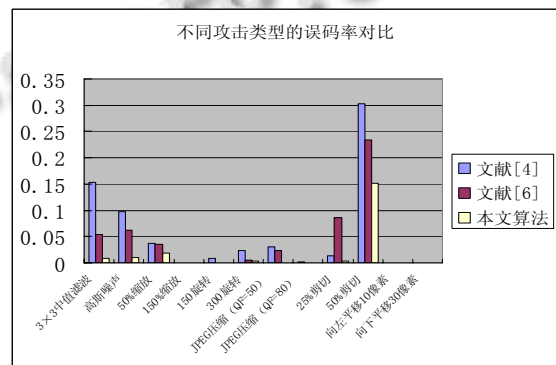


图6 面对不同攻击不同算法的误码率对比

为了验证水印的容量, 与文献[8]中的算法也进行了比较, 在确保视觉性的前提下, 本文的水印容量比文献[8]增大了4倍, 而且有更好的PSNR. 这是由于本文算法采用RR进行预滤波, 比临界采样预处理的转换系数数量要多, 虽然增加了计算的复杂度, 但却大大增加了水

印的容量. 实验结果如表2和图7-图9所示:

表2 嵌入水印容量对比

比较的算法	分解的级数	最大嵌入水印容量	PSNR	嵌入平均速度(秒)
文献[8]	3	32×32	45.918	0.134
本文算法	3	64×64	48.215	0.546

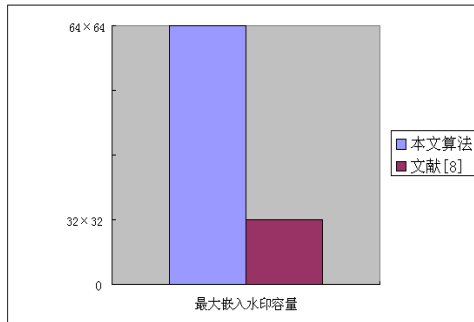


图7 最大嵌入水印容量对比

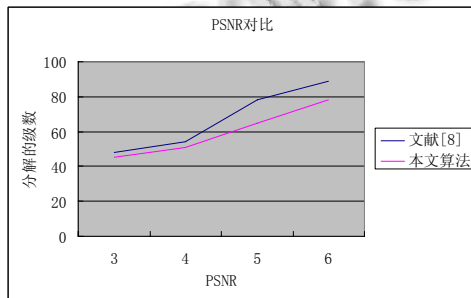


图8 PSNR对比

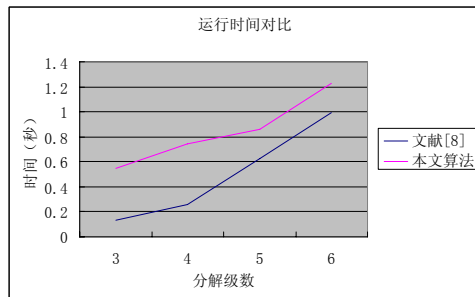


图9 运行时间对比

5 结语

本文利用多小波变换的正交性、紧支撑、高阶消

失矩和对称性等显著特点,对原始图片进行RR预滤波后使用GHM进行分解,选取分解出来的低频子带对水印信息位进行QIMM处理,在相应的分块中嵌入水印的信息,实现了图像水印的有效嵌入和盲提取.实验证明,该算法可以增加水印的容量而且有很好的视觉性和鲁棒性.

参考文献

- 1 石东源,卢炎生,王星华,段献忠.SVG及其在电力系统软件图形化中的应用初探.继电器,2004,32(16):37-40.
- 2 刘崇茹,孙宏斌,张伯明,董越,辛耀中.基于CIM XML电网模型的互操作研究.电力系统自动化,2003,27(14):45-48.
- 3 朱丽娟,王康元,张洁.基于SVG和Java的电力系统节点电压可视化.继电器,2006,34(5):60-61.
- 4 王志春,杨军,胡桂杰.基于Surfer Automation接口的气象等值线图的绘制.内蒙古气象,2006,31-33.
- 5 陈志波,陆雍森.Surfer在环境评价和规划中的应用.同济大学学报(自然科学版),2005,33(2):191-195.
- 6 章坚民,徐爱春,李海翔,等.基于SVG/XML/CIM的变电站自动化工程配置系统.电力系统自动化,2004,28(14):53-56.
- 7 Zhang JM, Xu AC, Li HX, et al. An automatic engineering configuration system for substation automation based on SVG/XML/CIM. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 53-56.
- 8 章坚民,楼坚.基于CIM/SVG和面向对象的配电单线图自动生成.电力系统自动化,2008,32(22):61-65.
- 9 吴延霞.Surfer软件嵌入VB编程在激光平地系统中的应用.德州学院学报,2006,12(6):101-102.
- 10 尼建军,张学宏.Surfer 7.0嵌入VB 6.0编程实现水文数据快速可视化.海洋测绘,2005,25(1),64-65.
- 11 韩丽娜,石昊苏.利用Surfer 8.0绘制地质等值线图.计算机与现代化,2008,11:85-88.
- 12 张二勇,李云峰,王玮.Surfer软件绘图接口的开发及应用.地下水,2005,27(3):212-214.