

基于整数小波变换的鲁棒零水印算法

曾文权¹, 熊祥光²

(1 广东省科技干部学院 计算机工程技术学院, 广东 珠海 519090;

2 贵州师范大学 数学与计算机科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 为提高零水印技术抵抗攻击的能力, 提出一种新的基于整数小波变换的鲁棒零水印算法. 算法先对版权信息进行预处理和对载体图像进行 2 级整数小波变换, 其次对低频子带进行互不重叠的分块, 根据每一分块的均值与低频子带的均值的大小关系得到特征矩阵, 最后将此特征矩阵与预处理后的版权信息结合构造零水印信息, 预处理之后再注册到知识产权数据库里. 仿真实验结果表明, 该算法对常规的信号处理、缩放及旋转等攻击具有较强的鲁棒性. 与相似的零水印技术相比, 该算法具有更优越的性能.

关键词: 图像水印; 零水印; 整数小波变换; 鲁棒性

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)04-0097-05

Robust Zero Watermarking Algorithm Based on Integer Wavelet Transform

ZENG Wen-quan¹, XIONG Xiang-guang²

(1 School of Computer Engineering & Technology, Guangdong Institute of Science & Technology, Zhuhai 519090, China;

2 School of Mathematics and Computer Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to enhance the robustness of zero watermarking technology, a new robust zero watermarking algorithm based on integer wavelet transform is proposed. Firstly, the copyright information is preprocessed and the original image is transformed by 2 level integer wavelet transform. Secondly, the low frequency sub-band is divided into non-overlapping blocks and a feature matrix is produced by judging the numerical relationship between the mean of each block and low frequency sub-band. Finally, the zero watermarking information is constructed by the feature matrix and the preprocessed copyright information, and then it is registered in intellectual property rights database after preprocessing. Experimental results show that the proposed algorithm has strong robustness against conventional signal processing, scaling and rotation attacks. Compared with similar technologies, it has a superior performance.

Key words: image watermarking; zero watermarking; integer wavelet transform; robustness

1 引言

传统的鲁棒水印技术^[1-2]将标识产品版权信息的水印信号嵌入到载体图像中, 对常规的信号处理和部分几何攻击具有较强的鲁棒性, 对数字多媒体

产品的版权保护具有非常重要的意义. 一般来说, 水印嵌入强度越大, 水印的鲁棒性越好, 但是图像的失真也越大, 透明性较差. 虽然许多学者在水印的透明性和鲁棒性的折中之间进行了诸多探索, 但还是不可避免地需要对原始载体图像进行修改, 造成图像

收稿日期: 2015-06-15; 修回日期: 2015-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(61309006); 贵州省科学技术厅、贵州师范大学联合科技基金资助项目(黔科合 LH 字[2014]7041 号); 2013 广东省千百十高层次人才培养资助项目(粤财教[2013]24 号)

质量的下降。

目前,已提出一些零水印算法.文献[3]提出一种新颖的鲁棒数字水印技术——零水印.文献[4]提出基于离散小波变换变换的零水印技术,文献[5]提出基于支持向量回归的零水印方案,文献[6]提出基于 Contourlet 变换和奇异值分解的零水印算法,实验结果表明这 2 种算法都具有较好的鲁棒性,但是算法的复杂度略高.文献[7]提出基于方差的奇异值分解域零水印方案,文献[8]提出基于离散小波变换与奇异值分解和非负矩阵分解与奇异值分解的混合变换域零水印算法,实验结果表明都具有较好的鲁棒性,但计算复杂度略高.尽管上述方法对常规的信号处理攻击都具有较好的抵抗能力,但也存在诸多不足,比如计算复杂度偏高、抗旋转及行列偏移等几何攻击的抵抗能力较弱等.鉴于此,提出一种新的基于整数小波变换的鲁棒零水印算法.实验结果表明,该算法对常规的信号处理、行列偏移攻击、缩放和旋转攻击具有较强的抵抗能力.与相似的零水印技术相比,该算法具有更优越的性能。

2 整数小波变换

整数小波变换是以提升方案小波变换为基础的,其运算过程仅包含移位和加减运算,实现了整数到整数的映射.该变换的主要思想是将小波滤波器分解成基本的构造模块,分步骤完成小波变换,其过程分为分裂、预测和更新 3 个步骤^[2].

(1) 分裂:将信号 $x(n)$ 分裂成两个互不重叠的奇数序列子集 $\{x_o(k) = x(2k+1)\}$ 和偶数序列子集 $\{x_e(k) = x(2k)\}$.

(2) 预测:设预测操作为 $P(\cdot)$,预测产生的误差信号为 $d(k)$,则 $d(k) = x_o(k) - P(x_e(k))$.

(3) 更新:通过将一个更新算子 $U(\cdot)$ 作用于 $d(k)$,并将之加到 $x_e(k)$ 上来获得原始信号 $x(n)$ 的逼近 $c(k)$,即 $c(k) = x_e(k) + U(d(k))$.

综上,整数小波变换可表示为: $d(k) = x_o(k) - \text{int}[P(x_e(k))]$, $c(k) = x_e(k) + \text{int}[U(d(k))]$,相应的整数小波逆变换可表示为: $x_e(k) = c(k) - \text{int}[U(d(k))]$, $x_o(k) = d(k) + \text{int}[P(x_e(k))]$,其中, $\text{int}[\cdot]$ 表示四舍五入取整运算。

与离散小波变换和提升小波变换一样,图像经过整数小波变换后,生成水平方向、垂直方向和对角方向 3 个细节子带和 1 个低频子带.若需进行多级的整数小波变换,可对上一级变换得到的低

频子带进行分解.图像变换后,图像的主能量主要集中在低频子带,抗干扰能力强,而 3 个细节子带的能量都较小,抗干扰的能力较弱.因此,为增强零水印算法的鲁棒性,本文选择在低频子带产生零水印信息。

3 零水印构造及版权认证算法

3.1 零水印构造算法

零水印的构造过程框图如图 1 所示,详细的零水印产生过程如下。

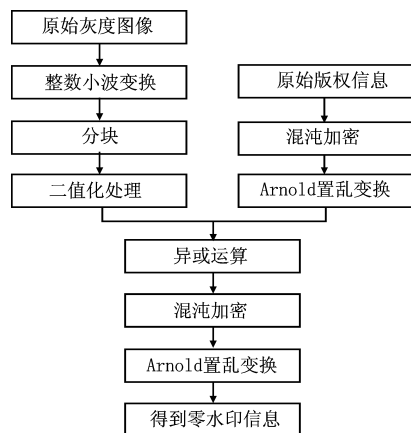


图 1 零水印构造过程

(1) 对原始载体图像(若原始载体图像是彩色图像,则先将其转化为灰度图像)进行 2 级整数小波变换,设得到的低频子带为 LL_2 。

(2) 利用文献[1]中的原始水印图像预处理方法,先对水印图像 W 进行混沌加密,之后再继续进行 Arnold 置乱,得到加密后的版权信息 W' 。

(3) 根据原始水印图像的大小,对低频子带 LL_2 进行互不重叠的分块,使 LL_2 子带正好能嵌入所有的水印信号(每个分块仅嵌入一位水印信号)。

(4) 分别计算 LL_2 子带和每一分块的均值,设为 M 和 A_{ij} .若 A_{ij} 大于 M ,则生成的二值信号 B_{ij} 为 1,否则, B_{ij} 为 0. 即

$$B_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } A_{ij} > M \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

(5) 将步骤(2)和步骤(4)分别得到的版权信息 W' 和二值矩阵 B 进行异或运算,之后再按步骤(2)中的方法对其进行混沌加密和 Arnold 置乱处理,得到最终的零水印信息 W'' 。

(6) 将最终得到的零水印信息 W'' 在 IPR 信息数据库中注册,构造过程结束.零水印信息一旦注册成功,就可以认为原始的载体图像已受到水印技术

的保护.

3.2 零水印提取和版权认证算法

零水印的提取过程与构造过程相似,相应的提取过程框图如图 2 所示. 详细的零水印提取过程如下.

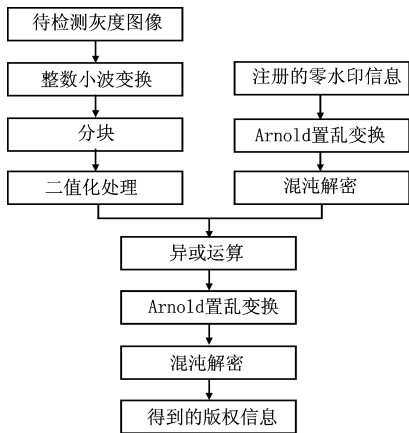


图 2 零水印提取过程

(1)对待检测的图像(可能已受到攻击处理)进行 2 级整数小波变换,设得到的低频子带为 LL'_2 .

(2)利用文献[1]中的原始水印图像预处理方法,先对在 IPR 数据库中注册的零水印信息 W'' 进行逆 Arnold 置乱,之后再再进行混沌解密,得到解密后的信息 W' .

(3)与零水印的构造过程相同,根据零水印信息的大小,对低频子带 LL'_2 进行互不重叠的分块,使 LL'_2 子带正好能提取所有的水印信号(每个分块仅提取出一位水印信号).

(4)分别计算 LL'_2 子带和每一分块的均值,设为 M' 和 A'_{ij} . 若 A'_{ij} 大于 M' , 则生成的二值信号 B'_{ij} 为 1, 否则, B'_{ij} 为 0. 即

$$B'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } A'_{ij} > M' \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

(5)将步骤(2)和步骤(4)分别得到的版权信息 W' 和二值矩阵 B' 进行异或运算,之后再按步骤(2)中的方法对其进行逆 Arnold 置乱和混沌解密,得到最终提取的零水印信息 W .

(6)采用归一化互相关(Normalize Correlation, NC)系数来客观评判原始的零水印信息与提取的零水印信息的相似性. NC 的计算公式分别如下:

$$NC = \sum \sum (W' \oplus \bar{W}) / (K \times G) \quad (3)$$

式中, K 和 G 分别表示生成的零水印信息的长和宽,

W' 表示提取的零水印信息, $\bar{W}$ 表示对原始的零水印信息进行逻辑非运算, 符号 $\oplus$ 表示异或运算.

4 实验结果及分析

为验证提出算法的性能,在 Windows 7 操作系统和 Matlab R2010a 平台上对该算法进行了实验. 原始载体图像为 8 幅大小为 512×512 的标准灰度图像,分别为 Barb、Boat、Couple、Elain、Goldhill、Lena、Peppers 和 Zelda,如图 3 所示. 原始的版权信号采用大小为 64×64 ,标识“数字水印”的有意义的二值图像,如图 3 所示. 以 Haar 小波作为小波基,对载体图像进行 2 级整数小波变换,低频子带的分块大小为 2×2 . 为了验证该算法的性能,将该算法与文献[4]和文献[7]中的算法进行比较. 对于文献[4]中的算法,先对载体图像进行 2 级离散小波变换,之后对低频子带进行 2×2 的分块. 对于文献[7]中的算法,先对载体图像进行 8×8 的分块,之后对每一分块进行奇异值分解.



图 3 原始图像

4.1 不同零水印间的相似性测试

从零水印信息的构造过程可以看出,零水印信息与原始载体图像的内容高度相关. 因此,由不同载体图像生成的零水印信息应相互独立,即相似度应尽可能小. 为验证根据不同载体图像构造的零水印的相似度,选择图 3 中的 8 幅标准灰度图像进行测试,相应的实验结果如表 1 所示. 从表 1 可以看出,不同载体图像零水印信息间的最小相似度为 0.431 9,最大相似度为 0.583 5. 为进一步验证零水印信息间的相似度,产生产生 100 个服从均匀分布的随机序列,计算它们与 Lena 图像零水印间的相似度(第 50 个序列为 Lena 图像零水印信息),相应的实验结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出,除第 50 个序列外,其他水印序列与原始零水印信息间的相似度都在 0.5 上下小幅度波动.

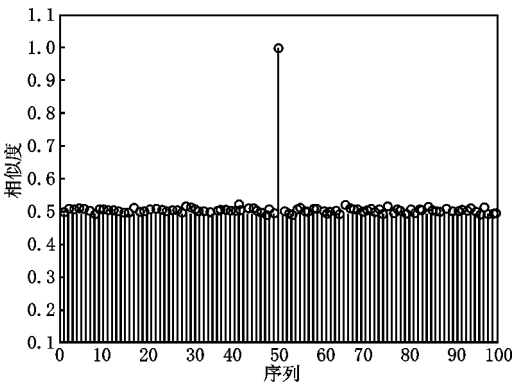


图 4 Lena 图像零水印与随机序列间的相似度

表 1 不同图像零水印之间的相似度

	Barb	Boat	Couple	Elain	Goldhill	Lena	Peppers	Zelda
Barb	1.000 0	0.534 9	0.490 5	0.528 8	0.494 1	0.450 2	0.470 0	0.460 4
Boat	0.534 9	1.000 0	0.583 5	0.480 7	0.593 5	0.520 8	0.531 3	0.450 0
Couple	0.490 5	0.583 5	1.000 0	0.489 5	0.545 2	0.554 0	0.485 4	0.431 9
Elain	0.528 8	0.480 7	0.489 5	1.000 0	0.565 9	0.508 3	0.476 8	0.503 9
Goldhill	0.494 1	0.593 5	0.545 2	0.565 9	1.000 0	0.473 6	0.503 2	0.500 5
Lena	0.450 2	0.520 8	0.554 0	0.508 3	0.473 6	1.000 0	0.452 9	0.475 6
Peppers	0.470 0	0.531 3	0.485 4	0.476 8	0.503 2	0.452 9	1.000 0	0.527 6
Zelda	0.460 4	0.450 0	0.431 9	0.503 9	0.500 5	0.475 6	0.527 6	1.000 0

度在降低,但是即使添加 25 倍的随机噪声,该算法提取的水印与零水印的相似度也为 0.976 3,表现出超强的鲁棒性.从表 2 也可以看出,该算法的抗攻击能力明显强于文献[4]和文献[7]中的算法.

表 2 随机噪声攻击实验结果

噪声的大小	5 倍	10 倍	15 倍	20 倍	25 倍
提出的算法	0.995 8	0.991 7	0.986 8	0.981 9	0.976 3
文献[4]	0.898 2	0.802 2	0.705 8	0.633 8	0.569 1
文献[7]	0.861 8	0.768 1	0.713 1	0.699 5	0.669 4

(2)其他噪声攻击测试

对原始图像分别添加均值为 0,方差分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 及 0.5 的高斯噪声、椒盐噪声及乘性噪声攻击处理,相应的实验结果如表 3 所示.从表 3 可以看出,该算法抗高斯噪声、椒盐噪声及乘性噪声攻击的能力优于文献[4]和文献[7]中的算法.

(3)滤波攻击测试

对原始图像分别进行窗口大小为 3×3 、 5×5 、 7×7 、 9×9 及 11×11 的维纳滤波、中值滤波及高斯低通滤波攻击处理,相应的实验结果如表 4 所示.从表 4 可以看出,该算法对维纳滤波、中值滤波及高斯低通滤波攻击具有较好的鲁棒性.与文献[4]和文献[7]中的算法相比,该算法具有更好的抗攻击能力.

4.2 抗常规信号处理攻击测试

通常,图像都会遭受到诸如噪声、滤波及压缩等常规信号处理.因此,提出的零水印算法应该能抵抗这些常规的信号处理攻击.下面以 Lena 图像作为原始载体图像进行抗常规信号处理攻击能力测试,其他载体图像的实验结果与 Lena 图像相似.

(1)随机噪声攻击测试

对原始图像分别添加 5 倍、10 倍、15 倍、20 倍和 25 倍的随机噪声攻击处理,相应的实验结果如表 2 所示.从表 2 可以看出,随着随机噪声幅度的增大,提取的零水印信息与原始的零水印信息的相似

表 3 高斯、椒盐和乘性噪声攻击实验结果

方差的大小		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
高斯噪声	提出的算法	0.972 2	0.970 7	0.967 5	0.942 9	0.904 8
	文献[4]	0.460 4	0.551 0	0.462 6	0.512 7	0.481 2
	文献[7]	0.678 7	0.680 4	0.657 0	0.650 9	0.651 4
椒盐噪声	提出的算法	0.956 1	0.936 5	0.917 0	0.878 9	0.846 7
	文献[4]	0.495 6	0.506 1	0.476 6	0.503 9	0.497 8
	文献[7]	0.614 3	0.564 9	0.525 9	0.520 0	0.504 6
乘性噪声	提出的算法	0.960 0	0.950 4	0.941 4	0.928 0	0.927 7
	文献[4]	0.537 1	0.490 7	0.515 4	0.518 6	0.504 2
	文献[7]	0.633 3	0.585 4	0.579 3	0.556 9	0.545 4

表 4 滤波攻击实验结果

窗口的大小		3×3	5×5	7×7	9×9	11×11
维纳滤波	提出的算法	0.994 6	0.991 9	0.986 1	0.982 9	0.977 5
	文献[4]	0.942 1	0.870 6	0.778 3	0.684 6	0.620 1
	文献[7]	0.932 1	0.886 5	0.852 1	0.818 4	0.789 6
中值滤波	提出的算法	0.997 1	0.992 2	0.986 3	0.981 4	0.976 8
	文献[4]	0.917 0	0.835 7	0.784 2	0.752 0	0.718 8
	文献[7]	0.918 5	0.872 6	0.830 8	0.801 0	0.764 9
高斯低通滤波	提出的算法	0.994 9	0.995 1	0.994 6	0.994 6	0.994 6
	文献[4]	0.952 1	0.952 1	0.952 1	0.952 1	0.952 1
	文献[7]	0.946 5	0.946 5	0.946 5	0.946 5	0.946 5

(4)JPEG 压缩攻击测试

对原始图像分别进行品质百分数为 10、20、30、40 及 50 的 JPEG 压缩攻击处理,相应的实验结果如表 5 所示.从表 5 可以看出,该算法对 JPEG 压缩攻击具有较好的抗攻击能力.与文献[4]和文献[7]中的算法相比,提出的算法具有更强的鲁棒性.

表 5 JPEG 压缩攻击实验结果

品质百分数	10	20	30	40	50
提出的算法	0.989 5	0.987 5	0.992 7	0.994 4	0.993 9
文献[4]	0.503 7	0.896 5	0.834 2	0.848 1	0.890 6
文献[7]	0.711 2	0.801 3	0.847 4	0.865 7	0.883 1

表 6 偏移行列攻击实验结果

攻击的类型	右移 2 列	左移 2 列	上移 2 行	下移 2 行	先右移 2 列,再上移 2 行
提出的算法	0.959 7	0.945 8	0.966 1	0.966 8	0.955 3
文献[4]	0.633 5	0.616 2	0.707 0	0.705 6	0.616 5
文献[7]	0.844 7	0.840 1	0.845 9	0.844 0	0.799 4

(2)缩放和旋转攻击

对原始图像分别进行缩放和旋转攻击测试,相应的实验结果如表 7 所示.从表 7 可以看出,提出的

表 7 缩放和旋转攻击实验结果

攻击的类型	先放大 2 倍再 缩小 0.5 倍	先缩小 0.5 倍 再放大 2 倍	逆时针 旋转 1°	逆时针 旋转 3°	先逆时针旋转 1°, 再顺时针旋转 1°	先逆时针旋转 3°, 再顺时针旋转 3°
提出的算法	0.995 8	0.994 9	0.938 0	0.847 4	0.983 2	0.962 6
文献[4]	0.989 3	0.964 4	0.599 1	0.516 4	0.929 7	0.927 7
文献[7]	0.975 8	0.937 5	0.789 6	0.707 8	0.919 7	0.919 7

综上,提出的算法对常规的信号处理攻击、偏移行列攻击、缩放和旋转攻击都具有较强的鲁棒性.与文献[4]和文献[7]中的零水印技术相比,该算法具有更强的鲁棒性.

4.4 构造零水印信息时间测试

算法的实验环境为 Windows 7(旗舰版)和

表 8 构造零水印信息运行时间

	Barb	Boat	Couple	Elain	Goldhill	Lena	Peppers	Zelda	平均
提出的算法	0.356 3	0.379 1	0.383 0	0.370 8	0.367 0	0.358 8	0.393 1	0.367 5	0.372 0
文献[4]	0.416 3	0.419 6	0.419 8	0.412 2	0.428 2	0.437 3	0.432 8	0.432 9	0.424 9
文献[7]	0.768 4	0.773 5	0.770 2	0.780 0	0.776 8	0.771 3	0.766 0	0.771 5	0.772 2

5 结束语

提出一种基于整数小波变换的鲁棒零水印算法.该算法的特点如下:第一,将混沌加密和 Arnold 置乱技术引入到版权信息的预处理及生成的零水印信息的后期处理当中,增强了算法的安全性;第二,对原始载体图像进行 2 级整数小波变换,之后对低

4.3 抗几何攻击测试

(1)偏移行列攻击

对原始图像进行偏移行列攻击测试,相应的实验结果如表 6 所示.在表 6 中,向右移 2 列指整个载体图像向右移 2 列,左边 2 列的像素全设置为 0,最后 2 列的像素丢失.向左移 2 列、向上移 2 行及向下移 2 行的处理过程与向右移 2 列的过程基本相同.从表 6 可以看出,该算法能抵抗这些攻击,但文献[4]和文献[7]抵抗这些攻击的能力较弱.

算法、文献[4]和文献[7]都能抵抗缩放攻击,但对于旋转攻击,该算法具有更优越的性能.

Matlab R2010a,电脑的 CPU 为 AMD Sempron (tm) X2 180 Processor 2.40 GHz,内存容量 2 GB,硬盘容量 150 GB.相同条件下,提出的算法、文献[4]和文献[7]构造零水印信息的运行时间如表 8 所示.从表 8 可以看出,该算法构造零水印信息的运行时间明显小于文献[4]和文献[7]中的算法.

频子带进行互不重叠的分块,根据每一分块的均值与低频子带的均值的大小关系构造特征矩阵,最后将该特征矩阵与预处理后的版权信息进行异或运算得零水印信息.实验结果表明,该算法对常规的信号处理、行列偏移攻击、缩放和旋转攻击具有较强的鲁棒性.与文献[4]和文献[7]中的零水印技术相比,该算法具有更优越的性能. (下转第 107 页)

- ACM international conference on Multimedia. New York, NY, USA: ACM, 2010: 783-786.
- [2] Min Chen. AMVSC: A framework of adaptive mobile video streaming in the cloud[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(4): 811-820.
- [3] Zhenhua Li, Yan Huang, Gang Liu, et al. Cloud-transcoder: bridging the format and resolution gap between internet videos and mobile devices[C]//Proceedings of the 22nd ACM international workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video. New York, NY, USA: ACM, 2012: 33-38.
- [4] Vaquero L M, Rodero-Merino L. Finding your way in the fog: towards a comprehensive definition of fog computing[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(5): 27-32.
- [5] Shen H, Sun X, Wu F, et al. A fast downsizing video transcoder for H. 264/AVC with rate-distortion optimal mode decision[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. [s. l.]: IEEE, 2006: 2017-2020.
- [6] 林闯,胡杰,孔祥震. 用户体验质量(QoE)的模型与评价方法综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 1-15.
- [7] Zhou Y, Fu T Z J, Chiu D M, et al. An adaptive cloud downloading service[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(4): 802-810.
- [8] Jiwei Li, Kai Bu, Xuan Liu, et al. ENDA: Embracing network inconsistency for dynamic application offloading in mobile cloud computing[C]//Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Mobile cloud computing. New York, NY, USA: ACM, 2013: 39-44.

作者简介:

邹露宁 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为移动云计算、移动互联网、移动多媒体. E-mail: zouluning@163.com.

白光伟 男, (1961-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为云计算、移动互联网、无线多媒体网络、多媒体网络服务质量等.

沈航 男, (1984-), 博士, 讲师. 研究方向为云计算、无线网络编码、无线多媒体通信协议等.

纪传伟 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为云计算、视频通话.

(上接第 101 页)

参考文献:

- [1] 邹长华, 谭世恒, 林土胜. 基于混沌置乱和混沌加密的 DCT 域数字水印算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(5): 58-62.
- [2] 熊祥光, 王力, 瞿云云. 基于整数小波变换的彩色视频水印算法[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(4): 41-46.
- [3] 温泉, 孙钺锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.
- [4] 吴胜兵, 张定会, 霍瑶, 等. DWT 系数分块的零水印方案[J]. 数据通信, 2014, 34(3): 22-25.
- [5] Gao G Y, Jiang G P. Zero-bit watermarking resisting geometric attacks based on composite chaos optimized SVR model [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18(2): 94-101.
- [6] Vellaisamy S, Ramesh V. Inversion attack resilient zero-watermarking scheme for medical image authentication [J]. IET Image Processing, 2014, 8(12): 718-727.
- [7] 叶天语. 基于方差的奇异值分解域鲁棒零水印算法[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 961-966.
- [8] 潘黄琼, 陈光喜, 丁勇, 等. 彩色图像 DWT 变换下的块 SVD 零水印[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(5): 50-53.

作者简介:

曾文权 男, (1979-), 硕士, 副教授. 研究方向为数字水印、图像处理和分析.

熊祥光(通信作者) 男, (1984-), 硕士, 讲师. 研究方向为图像处理和数字水印技术. E-mail: xxg0851@163.com