

# 基于可变形多尺度变换的几何不变鲁棒图像水印算法

王春桃<sup>1,2</sup> 倪江群<sup>1</sup> 卓华硕<sup>1</sup> 黄继武<sup>1</sup>

**摘要** 尽管过去十多年鲁棒数字水印取得了长足的进展,然而如何有效地抵抗几何变换仍然是鲁棒数字水印的关键问题之一.本文通过设计具有平移不变性、可旋转和可缩放特性的可变形多尺度变换(Deformable multi-scale transform, DMST)来抵抗全局几何攻击.基于此变换,本文从理论上推导几何同步机制,然后进一步利用它并辅助于模板来设计能有效估计几何攻击参数的算法.此外,将常规(双)正交小波域隐马尔科夫模型进一步推广到可旋转小波域,以提高水印的检测性能.实验结果表明本文算法对于常见信号处理攻击、全局几何攻击及其联合攻击具有很好的鲁棒性.

**关键词** 数字水印,鲁棒性,可变形多尺度变换,几何攻击,隐马尔科夫模型

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2011.01368

## A Geometrically Invariant Robust Image Watermarking Based on Deformable Multi-scale Transform

WANG Chun-Tao<sup>1,2</sup> NI Jiang-Qun<sup>1</sup> ZHUO Hua-Shuo<sup>1</sup> HUANG Ji-Wu<sup>1</sup>

**Abstract** The robustness against geometrical transforms is still one of major concerns in robust watermarking although significant improvements have been achieved in past decades. This paper tackles the global geometrical attacks by designing a deformable multi-scale transform (DMST) with joint shiftability in position, orientation and scale. Via DMST, we derive theoretically the principles for geometrical synchronization and then utilize it to develop a template-based scheme to efficiently estimate geometrical parameters. The hidden Markov model in the standard wavelet domain is extended to the steerable wavelet domain, which is further used to improve the watermark extraction performance. Experimental simulation demonstrates that the proposed watermarking scheme is quite robust to common signal processing, global geometrical attacks, and their joint attacks.

**Key words** Digital watermarking, robustness, deformable multi-scale transform (DMST), geometric attack, hidden Markov model

在过去的十余年中,为了应对多媒体数字信号处理技术和互联网发展带来的诸如版权保护、内容认证等问题,数字水印得到了充分的发展和应用<sup>[1]</sup>.由于小波变换具有良好的时频特性,因此众多的数字水印算法采用小波变换来获得良好的稳健性和视觉效果.然而,常见的(双)正交小波变换对输入信号的几何变换敏感,即几何变换(一维信号为平移,二维信号为平移、旋转和/或缩放)前后的输入信号经小波变换后,各自的小波系数不存在简单的几何变换关系,而且也不能构成反映几何变换参数的函数关系<sup>[2]</sup>.为了解决这个问题,一些研究人员提出了

常规小波变换的变种.

Freeman 等<sup>[3]</sup>提出了可旋转(Steerable)分析滤波器,使得任意角度方向的滤波器(子带)都可以通过对可旋转基滤波器(子带)的简单线性插值而得到.随后,Perona<sup>[4-5]</sup>提出了可缩放(Scalable)分析滤波器,并将可旋转和可缩放分析滤波器推广到可变形(Deformable)分析滤波器.

Simoncelli 等<sup>[2]</sup>将可旋转滤波器推广到更一般化的、具有几何可变(Shiftability)特性的滤波器,如可平移、可旋转和可缩放滤波器等.同时,他们也提出了联合几何可变形滤波器的概念.作为该概念的一个示例,他们在文献[2]中提出了一种同时具有平移不变性和可旋转特性的金字塔变换(Steerable pyramid transform, SPT).此外,文献[6-7]中分别提供了用数值优化和封闭式推导方法得到的 SPT.

Freeman 等<sup>[3]</sup>以及 Perona<sup>[4-5]</sup>提出的滤波器,都是用于计算机识别的分析滤波器,并不涉及综合滤波器. Simoncelli 等<sup>[2]</sup>提出的金字塔变换则同时具有分析和综合滤波器.然而,根据我们对文献的了解和掌握,在相关文献中没有同时具有平移、旋转、缩放可变特性的、实际的金字塔变换.

收稿日期 2011-02-22 录用日期 2011-06-13

Manuscript received February 22, 2011; accepted June 13, 2011  
国家基础研究发展计划(973计划)(2011CB302204),国家自然科学基金(60970145),中国博士后科学基金(20090460832),华南农业大学校长基金(5600-k11003)资助

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB302204), National Natural Science Foundation of China (60970145), China Postdoctoral Science Foundation (20090460832), and President Foundation of South China Agricultural University (5600-k11003)

1. 中山大学信息科学与技术学院 广州 510006 2. 华南农业大学信息学院 广州 510642

1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006 2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642

出于抵抗施加于水印的平移、旋转、缩放等几何攻击的目的, 我们拟设计同时具有平移、旋转和缩放可变/不变特性的可变形多尺度(多分辨率)金字塔变换. 考虑到对 SPT 滤波器的缩放只会影响到它的径向分量而不会影响到其角度分量, 因此我们可以根据可变形滤波器的相关理论<sup>[2]</sup>将 SPT 分析滤波器的径向分量设计成具有可缩放特性, 同时又保持它的角度分量以实现可旋转特性, 这样就可以获得同时具有可旋转和可缩放特性的分析滤波器. 这种设计方式只对 SPT 的分析滤波器进行分解, 但并没有改变 SPT 第一层分解的非亚抽样结构, 因而能继承它的平移不变特性, 也就是说新设计的变换将具有平移不变性、可旋转和可缩放特性. 为简便记, 我们将此新设计的变换称之为可变形多尺度变换(Deformable multi-scale transform, DMST).

根据 DMST 的设计思路可知, DMST 是非对称的, 即它具有可旋转的分析和综合滤波器, 但只具有可旋转和可缩放的分析滤波器. 考虑到我们只需要可变形分析滤波器来估计旋转和缩放参数, 而可以利用可旋转分析和综合滤波器实现水印的嵌入和检测, 因此这种非对称的 DMST 是可行的, 可以满足我们设计抵抗几何攻击数字水印系统的需求.

基于 DMST 的平移不变性、可旋转和可缩放特性, 我们可以推导几何同步机制. 即通过理论推导方法, 获得输入信号在经受平移、旋转或/和缩放前后 DMST 各子带之间的、与几何变换参数有关的函数关系. 基于这些函数关系, 就可以估计出几何变换参数.

通过利用基于 DMST 的几何同步机制, 我们设计能抵抗几何攻击的鲁棒水印算法. 经过十余年的发展, 相关文献中已经提出了很多较有效抵抗几何攻击的盲水印算法, 它们大致可以分为如下四类<sup>[8-10]</sup>: 1) 在载体不变域中嵌入水印<sup>[11-16]</sup>; 2) 周期性重复插入多个序列, 利用互相关函数进行检测<sup>[17-19]</sup>; 3) 利用与载体内容有关的特征点来嵌入水印<sup>[13, 20-22]</sup>; 4) 利用嵌入的模板实现同步<sup>[23-25]</sup>, 如模板在傅里叶域而水印在小波域<sup>[24]</sup>. 方法 1) 将原始载体变换到几何不变域, 如 Fourier-Mellin 域<sup>[11]</sup>、几何不变矩<sup>[12-15]</sup>、直方图<sup>[16]</sup>等, 然后在几何不变域中进行水印的嵌入和检测. 由于这些变换域不受几何变换的影响, 因此嵌入在其中的水印能较好地抵抗几何变换. 方法 2) 在嵌入时周期性地重复插入多个水印序列, 在检测时则利用这些水印序列的自相关函数特性来估计几何变换参数. 方法 3) 首先找到与内容相关的特征点, 接着利用特征点构造某种不受几何变换影响的局部区域(如 Delaunay 三角形<sup>[20]</sup>、以特征点为圆心的归一化区域<sup>[13, 21-22]</sup>等), 最后在这些局部区域中实现水印的嵌入和检测. 方

法 4) 在载体(如傅里叶域<sup>[23-24]</sup>、小波域<sup>[25]</sup>等)中嵌入辅助性质的模板, 并通过在几何变换参数空间中搜索匹配模板来识别几何变换参数, 最后利用所识别的几何参数去校正待检测图像的几何攻击. 此外, 还有一些是利用 Krawtchouk 及回归型支持向量机来估计几何变换参数, 如文献<sup>[26]</sup>. 这几类方法各有优缺点, 并不能彻底地解决几何攻击问题. 若从水印信息的嵌入容量、嵌入水印后的载体视觉质量和对各类不同载体的普遍适用性等方面综合考虑, 则利用模板实现同步具有相对较好的性能. 在盲水印框架下, 我们通过结合基于 DMST 的几何同步机制并辅助于模板来估计几何变换参数, 并以此校正几何攻击.

借助于模板, 我们设计如下的鲁棒水印算法. 考虑到 DMST 的平移不变性是指子带具有与输入信号相同的平移, 也就是说平移会影响旋转和缩放参数的估计. 为避免平移造成的影响, 以输入图像傅里叶变换的幅度作为嵌入(检测)模板和水印的载体. 在嵌入时, 利用 SPT 将输入图像的傅里叶幅度分为三层的金字塔, 其中第一层(最高分辨率层)用于模板的嵌入, 第二和三层则用于水印信息的嵌入. 在检测时, 对于接收图像的傅里叶变换幅度, 我们首先利用 DMST 的可旋转和可缩放分析滤波器进行一层分解, 然后利用模板和基于 DMST 的几何同步机制估计旋转和缩放参数. 接着, 用估计得到的几何参数校正接收到的图像, 再进行傅里叶变换并计算它的幅度. 最后, 再次利用 SPT 进行三层金字塔的分解, 并在第二和三层中提取和还原嵌入的信息. 与此同时, 考虑到常规小波变换和 SPT 变换之间的相似时频特性, 将常规小波域的隐马尔科夫模型<sup>[27-28]</sup>扩展到可旋转小波域, 并基于此模型推导最优检测器来进行水印检测, 以便提高水印的检测性能.

通过利用 DMST 的几何可变形特性, 本算法有如下的特点: 1) 可以在同一变换域中嵌入模板和水印, 避免了在不同变换域中模板和水印因频带不隔离而相互影响的问题; 2) 避免了常规小波变换在几何变换情况下为估计几何参数而可能需要反复执行小波变换的问题, 较好地降低了计算复杂度; 3) 在模板匹配的过程中, 只计算潜在的、数量很少的模板点, 同时采用以较大步长逼近真值然后用较小步长精确搜索式由粗到精的搜索方法, 因此算法具有可接受的计算复杂度. 为了评估本文算法的性能, 我们对灰度图像进行了常规信号处理(如 JPEG 压缩、加噪、滤波等)攻击、全局几何攻击(平移、旋转、缩放、裁剪等)及其联合攻击, 然后用本文算法进行水印提取. 实验结果表明, 本文算法对于这些攻击具有良好的鲁棒性.

本文后续内容的安排如下: 第 1 节给出可变形

多尺度变换的设计, 第 2 节基于可变形多尺度变换的特点推导几何同步机制, 第 3 和 4 节分别给出本文所提出的算法和实验仿真, 第 5 节为本文的结论.

### 1 可变形多尺度变换的设计

文献 [2, 6-7] 分别设计了具有平移不变性和可旋转特性的金字塔变换 (SPT), 其中两个带通方向滤波器的 SPT 如图 1 的实线部分所示. 文献 [2, 6] 是以数值优化方式设计的, 通常不能获得理想重构; 文献 [7] 是以封闭解推导方式设计的, 则可以保证理想重构.

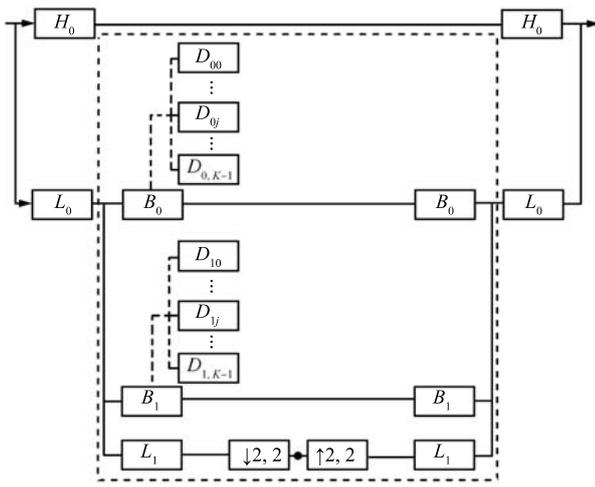


图 1 DMST 的结构 ( $H_0(\omega)$  和  $L_0(\omega)$  分别代表高通和低通滤波器;  $L_1(\omega)$  和  $B_i(\omega)$  ( $i = 0, 1$ ) 分别为低通和方向带通滤波器;  $D_{ij}(\omega)$  ( $i = 0, 1; j = 0, 1, \dots, K - 1$ ) 为由  $B_i(\omega)$  扩展得到的可变形滤波器. 虚线框内的子系统可代入图中的小黑圆圈内, 从而获得递归的金字塔变换. 图中的各滤波器符号代表的是频域的滤波器.)

Fig. 1 System diagram of DMST ( $H_0(\omega)$  and  $L_0(\omega)$  denote the high-pass and low-pass filters, respectively;  $L_1(\omega)$  and  $B_i(\omega)$  ( $i = 0, 1$ ) are the low-pass and oriented band-pass filters, respectively;  $D_{ij}(\omega)$  ( $i = 0, 1; j = 0, 1, \dots, K - 1$ ) are the deformable filters developed from  $B_i(\omega)$ . The subsystem within the dash-line box can be substituted into the small black circle to form the recursive pyramid.)

如前所述, 为了同时获得平移不变性、可旋转和可缩放特性以抵抗几何变换, 我们将 SPT 扩展成 DMST (可变形多尺度变换). 考虑到理想重构的 SPT 有助于获得具有良好不可见性的水印图像, 因此本文利用文献 [7] 中给出的 SPT 来设计 DMST; 同时, 为减小计算复杂度, 采用两个带通方向滤波器的 SPT (见图 1 实线部分) 来设计 DMST. 具体来说, 根据可变形滤波器的相关理论<sup>[2]</sup>, 我们把 SPT 中可旋转分析滤波器扩展为同时具有可旋转和可缩

放特性的可变形滤波器, 但保持综合滤波器不变. 据此, 我们可以得到如图 1 所示的 DMST 结构. 由于 SPT 的第一层分解没有进行亚抽样而具有平移不变性, 因此由 SPT 发展得到的 DMST 同时具有平移不变性、可旋转和可缩放特性.

由 SPT 扩展为 DMST 的具体设计如下. 根据文献 [7], SPT 可旋转滤波器的频域表达式为

$$B_i(r, \phi) = H(r)G_i(\phi), \quad i = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

其中,  $r = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$ ,  $\phi = \arg(\omega_x, \omega_y)$ , 而  $(\omega_x, \omega_y)$  为频域的坐标;  $N$  为可旋转基滤波器的个数 (如图 1 中  $N = 2$ ). 式 (1) 中的  $H(r)$  和  $G_i(\phi)$  定义为

$$H(r) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi}{2} \log_2\left(\frac{2r}{\pi}\right)\right), & \frac{\pi}{4} < r < \frac{\pi}{2} \\ 1, & r \geq \frac{\pi}{2} \\ 0, & r \leq \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (2)$$

$$G_i(\phi) = \frac{(N - 1)!}{\sqrt{N[2(N - 1)!]}} \left[ 2 \cos\left(\phi - \frac{\pi i}{N}\right) \right]^{N - 1} \quad (3)$$

由式 (1) 可知, 可旋转滤波器是极轴可分离的滤波器, 其中角度分量用以实现可旋转滤波器, 而径向分量则进一步可以用作核函数来设计 DMST 中的可缩放滤波器. 因此, 下面根据可变形特性的基本理论<sup>[2]</sup> 以及  $H(r)$  的特点来设计可缩放滤波器.

根据可变形滤波器的充要条件<sup>[2-3]</sup>, 基滤波器的个数必须大于或等于核函数的傅里叶复数表示形式中幅度不为零的傅里叶频率分量的个数. 因此, 当  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  时, 需要至少 2 个可缩放基滤波器; 当  $r \in [\pi/2, \infty)$  时, 需要至少 1 个可缩放基滤波器; 当  $r \in (0, \pi/4]$  时, 只有零幅度频率分量, 不需要基滤波器. 综合起来, 我们只需要对  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  的情况设计可缩放滤波器, 而对于  $r \in [\pi/2, \infty)$  和  $r \in (0, \pi/4]$  的情况则可以直接采用式 (2) 中的  $H(r)$  作为可缩放滤波器.

为简化设计, 同时减少滤波变换时的计算复杂度, 我们假定  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  时就采用两个可缩放基滤波器, 记为  $C_0(r)$  和  $C_1(r)$ . 根据可缩放滤波器的概念以及为了满足可缩放滤波器对称性的要求<sup>[2]</sup>, 构造为

$$C_j(r) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \log_2\left(\frac{2r}{\pi}\right) - \frac{\pi}{2} \log_2(\sigma_j)\right) + \cos\left(-\frac{\pi}{2} \log_2\left(\frac{2r}{\pi}\right) - \frac{\pi}{2} \log_2(\sigma_j)\right) \quad (4)$$

为简化表达式, 令式 (4) 中的  $\pi \log_2(\sigma_j)/2 =$

$\pm\pi/3$ , 即  $\sigma_j = 2^{\pm 2/3}$ , 则有

$$C_0(j) = C_1(j) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \log_2\left(\frac{2r}{\pi}\right)\right) \quad (5)$$

上式表明, 令  $\sigma_j = 2^{\pm 2/3}$ , 则两个可缩放基滤波器具有相同的表达式, 并且与  $H(r)$  在  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  情况下的表达式相同. 因此, 式 (2) 中的  $H(r)$  可以作为  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  情况下的可缩放滤波器. 也就是说, 图 1 中的可变形滤波器  $D_{ij}(r, \phi)$  ( $i = 0, 1; j = 0, 1$ ) 可以构造为

$$D_{ij}(r, \phi) = C_j(r)G_i(\phi) = H(r)G_i(\phi) \quad (6)$$

上式表明可变形滤波器  $D_{ij}(r, \phi)$  与可旋转滤波器  $B_{ij}(r, \phi)$  具有相同的表达形式.

基于上述的设置, 我们进一步推导根据基滤波器插值得到任意角度/尺度滤波器的插值函数. 首先考虑用于可缩放基滤波器的插值函数. 当  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  时, 根据可变形滤波器的充要条件<sup>[2]</sup>, 则可缩放滤波器的插值函数  $s_j(\sigma)$  ( $j = 0, 1$ ) 为下列方程的解

$$e^{j\sigma} = \begin{bmatrix} e^{j\sigma_0} & e^{j\sigma_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(\sigma) \\ s_1(\sigma) \end{bmatrix} \quad (7)$$

解上式可得

$$\begin{cases} s_0(\sigma) = \frac{\sin(\sigma - \sigma_1)}{\sin(\sigma_0 - \sigma_1)} \\ s_1(\sigma) = \frac{\sin(\sigma - \sigma_0)}{\sin(\sigma_1 - \sigma_0)} \end{cases} \quad (8)$$

既然  $C_0(r) = C_1(r)$ , 则根据  $\sum_{j=0}^1 s_j(\sigma)c_j(\sigma)$  的插值方式可以简化插值函数为

$$s(\sigma) = \frac{\cos\left(\sigma - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{2}\right)} \quad (9)$$

相应地, 可以求得  $r \in [\pi/2, \infty)$  时插值函数  $s_j(\sigma) = 1$ ,  $r \in (0, \pi/4]$  时的插值函数为任意值 (如  $s_j(\sigma) = 0$ ). 因此, 对于可缩放滤波器  $H(r)$  的插值函数为

$$s(\sigma) = \begin{cases} \frac{\cos\left(\sigma - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{2}\right)}, & \frac{\pi}{4} < r < \frac{\pi}{2} \\ 1, & r \geq \frac{\pi}{2} \\ 0, & r \leq \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (10)$$

其次, 推导用于可旋转基滤波器的插值函数. 如前所述, 为减少计算复杂度, 本文设定可旋转滤波

器的个数为  $N = 2$ , 则根据可变形滤波器的充要条件<sup>[2]</sup>, 针对式 (3) 所表示的可旋转滤波器的插值函数  $k(\phi)$  满足约束

$$e^{j\phi} = \begin{bmatrix} e^{j0} & e^{-j\frac{\pi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0(\phi) \\ k_1(\phi) \end{bmatrix} \quad (11)$$

解上式可得

$$\begin{cases} k_0(\phi) = \cos(\phi) \\ k_1(\phi) = -\sin(\phi) \end{cases} \quad (12)$$

综合可旋转和可缩放特性, 就可以获得几何可变形特性. 即对于任意角度方向和缩放尺度  $(\theta, \sigma)$  的滤波器  $F^{\theta, \sigma}(r, \phi)$ , 都可以由可缩放和可旋转基滤波器经过线性插值而获得, 有

$$F^{\theta, \sigma}(r, \phi) = [s(\sigma)H(r)] [G_0(\phi) \cos(\theta) - G_1(\phi) \sin(\theta)] \quad (13)$$

上式表明, 对于任意  $(\theta, \sigma)$  的滤波器  $F^{\theta, \sigma}(r, \phi)$ , 可以先通过可旋转滤波器  $G_0(\phi)$  和  $G_1(\phi)$  插值出角度  $\theta$  的方向滤波器, 然后再通过可缩放滤波器  $H(r)$  插值出尺度  $\sigma$  的滤波器.

为演示 DMST 分解的效果, 我们以  $512 \times 512$  的灰度图 Lena 为例. 鉴于本文算法在进行模板匹配时只需利用 DMST 进行一层的分解 (见第 3.2 节), 因此我们在这里只给出对 Lena 图进行一层 DMST 分解得到的基子带. 图 2(a) 和 2(b) 分别给出了针对原图的 DMST 基子带. 为了进一步展现 DMST 的几何特点, 我们将 Lena 图逆时针旋转  $30^\circ$  并放大 1.1 倍, 然后再进行 DMST 分解, 则此时得到的基子带如图 2(c) 和 2(d) 所示.

## 2 基于可变形多尺度变换的几何同步机制

图 1 所示的 DMST 具有平移不变性、可旋转和可缩放特性. 本节根据这些特性, 分别推导平移同步机制及旋转缩放联合同步机制, 以便在第 3 节用来估计几何攻击参数.

### 2.1 平移同步

DMST 的平移不变性源自于第一层 (最高分辨率层) 没有进行亚抽样而具有全分辨率, 因此输入信号平移前后各子带的信息和能量都保持在相应的子带内. 然而, 这里平移不变性的本质是指第一层各子带具有与输入图像相同的平移, 如下面给出的推导所示.

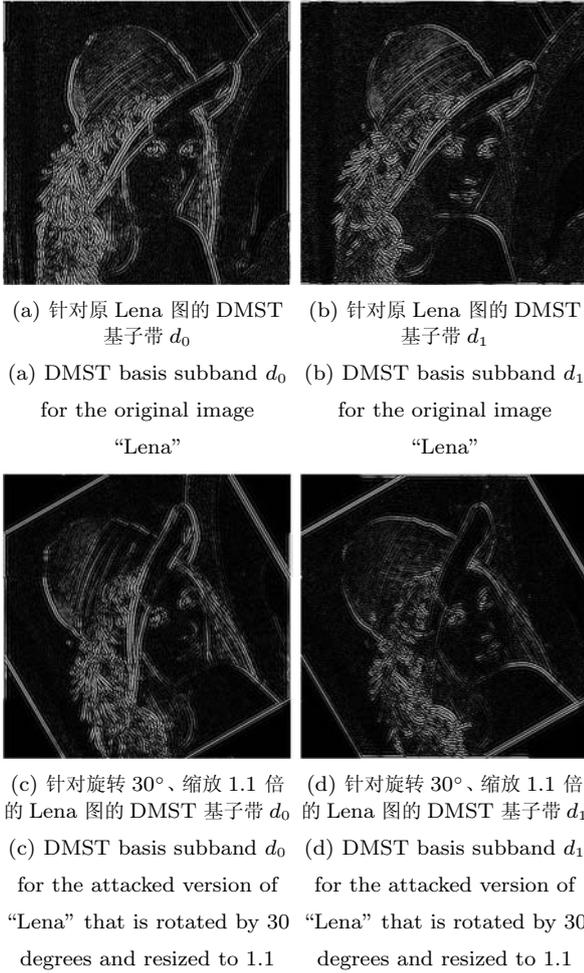


图2 DMST 一层分解效果示意图, 其中各图的像素值进行了适当的放大以便于显示效果

Fig. 2 Illustration of one-level decomposition using DMST, where image pixel values are scaled to be visible

设原始图像为  $I(x, y)$ , 平移后的图像为  $I^{x_0, y_0}(x, y) = \mathcal{T}_{x_0, y_0}[I(x, y)] = I(x - x_0, y - y_0)$ , 其中  $(x_0, y_0)$  是平移量,  $\mathcal{T}_{x_0, y_0}[\cdot]$  代表平移操作. 假设  $q_i(x, y)$  和  $q_i^{x_0, y_0}(x, y)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) 分别为  $I(x, y)$  和  $I^{x_0, y_0}(x, y)$  的 SPT 分解的 (对 DMST 也有相同的结果) 第一层基子带, 则根据图 1 可知,  $q_i(x, y) = I(x, y) * l_0(x, y) * b_i(x, y)$  和  $q_i^{x_0, y_0}(x, y) = I^{x_0, y_0}(x, y) * l_0(x, y) * b_i(x, y)$ , 其中 “\*” 代表卷积. 根据  $I^{x_0, y_0}(x, y)$  的定义, 则有  $q_i^{x_0, y_0}(x, y) = I(x - x_0, y - y_0) * l_0(x, y) * b_i(x, y)$ . 对  $q_i^{x_0, y_0}(x, y)$  和  $q_i(x, y)$  分别进行傅里叶变换, 则容易得到:

$$q_i^{x_0, y_0} = q_i(x - x_0, y - y_0) = \mathcal{T}_{x_0, y_0}[q_i(x, y)] \quad (14)$$

## 2.2 旋转和缩放的同步

根据式 (14), DMST 平移不变性的本质是第一层的各子带与输入信号具有相同的平移. 这意味着

平移会影响旋转和缩放的同步. 为避免这种影响, 本文采用输入图像傅里叶变换的幅度作为水印嵌入和检测的载体. 据此, 旋转和缩放同步的推导如下.

DMST 的可旋转/可缩放特性, 指的是任一角度方向的滤波器 (子带) 都可以通过对可旋转/可缩放基滤波器 (子带) 进行线性插值而获得. 根据这些特性, 旋转和缩放的联合同步机制推导如下.

假设  $I^{\theta, \sigma}(x, y) = \mathcal{G}_{\theta, \sigma}[I(x, y)]$  是原始图像  $I(x, y)$  绕原点逆时针旋转  $\theta$  角度以及缩放  $\sigma$  尺度后的图像, 其中  $\mathcal{G}_{\theta, \sigma}[\cdot]$  表示进行参数为  $(\theta, \sigma)$  的旋转和缩放操作. 设  $I(x, y)$  和  $I^{\theta, \sigma}(x, y)$  的傅里叶变换幅度分别为  $M(\omega_x, \omega_y)$  和  $M^{\theta, \sigma}(\omega_x, \omega_y)$ , 则有  $M^{\theta, \sigma} = \mathcal{G}_{\theta, 1/\sigma}[M]$ . 假定  $M(\omega_x, \omega_y)$  和  $M^{\theta, \sigma}(\omega_x, \omega_y)$  在 DMST 分解后的频域基子带分别为  $Q_i(\omega_x, \omega_y)$  和  $Q_i^{\theta, \sigma}(\omega_x, \omega_y)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ). 根据图 1 及第 1 节给出的可旋转和可缩放特性, 则  $M(\omega_x, \omega_y)$  在角度方向  $\psi$  和尺度因子  $\lambda$  的子带  $Q^{\psi, \lambda}$  可经线性插值而得到, 即有

$$Q^{\psi, \lambda} = \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\psi) s(\lambda) Q_i = \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\psi) s(\lambda) (ML_0 B_i) = M \left( \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\psi) s(\lambda) (L_0 B_i) \right) = MF^{\psi, \lambda} \quad (15)$$

其中,  $k_i(\cdot)$  和  $s(\cdot)$  分别是可旋转和可缩放特性的插值函数,  $F^{\psi, \lambda} = \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\psi) s(\lambda) (L_0 B_i)$ . 相应地,  $M^{\theta, \sigma}(\omega_x, \omega_y)$  在角度方向  $\theta + \psi$  和尺度因子  $\lambda/\sigma$  的子带  $Q^{\theta + \psi, \lambda/\sigma}$  为

$$Q^{\theta + \psi, \lambda/\sigma} = \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\theta + \psi) s\left(\frac{\lambda}{\sigma}\right) Q_i^{\theta, \sigma} = \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\theta + \psi) s\left(\frac{\lambda}{\sigma}\right) (M^{\theta, \sigma} L_0 B_i) = M^{\theta, \sigma} F^{\theta + \psi, \lambda/\sigma} \quad (16)$$

其中,  $F^{\theta + \psi, \lambda/\sigma} = \sum_{i=0}^{N-1} k_i(\theta + \psi) s(\lambda/\sigma) (L_0 B_i)$ . 比较式 (15) 和 (16) 可知:

$$Q^{\theta + \psi, \lambda/\sigma} = \mathcal{G}_{\theta, \frac{1}{\sigma}}[Q^{\psi, \lambda}] \quad \text{或} \quad Q^{\psi, \lambda} = \mathcal{G}_{\theta, \frac{1}{\sigma}}^{-1}[Q^{\theta + \psi, \lambda/\sigma}] \quad (17)$$

式 (17) 表明, 旋转和缩放的几何同步方式如下: 对  $I^{\theta, \sigma}(x, y)$  的傅里叶变换幅度进行一层 DMST 分解, 并经线性插值而生成  $\theta + \psi$  方向和  $\lambda/\sigma$  尺度的

子带  $Q^{\theta+\psi, \lambda/\sigma}$ , 然后再绕原点逆向旋转  $\theta$  和逆向缩放  $1/\sigma$ , 则可以得到  $I(x, y)$  的傅里叶变换幅度在  $\psi$  方向和  $\lambda$  尺度的 DMST 子带  $Q^{\psi, \lambda}$ ; 反之亦然。

### 3 几何不变鲁棒水印算法

本节根据基于 DMST 的几何同步机制, 给出具有平移、旋转和缩放不变性的鲁棒水印算法。其中, 平移不变性通过在傅里叶变换的幅度中嵌入/检测模板和水印而得到; 旋转和缩放不变性通过几何可变形特性而获得, 即先用可旋转和可缩放特性估计相应的参数, 然后再用估计得到的参数去校正旋转和缩放。

#### 3.1 模板和水印的嵌入

本文算法的嵌入流程如图 3 所示, 其中包括模板和水印的嵌入, 下面给出各步的具体操作。

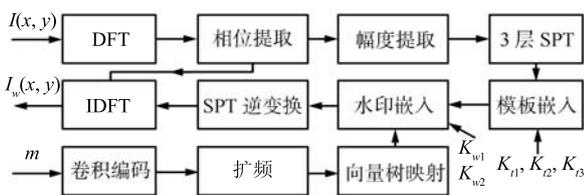


图 3 水印和模板的嵌入框图

Fig.3 System diagram of watermark and template insertion

##### 3.1.1 模板的嵌入

1) 对大小为  $H \times W$  的输入图像  $I(x, y)$  进行离散傅里叶变换 (Direct Fourier transformer, DFT), 并分别提取相位和幅度;

2) 对傅里叶变换幅度进行 3 层的可旋转金字塔变换 (SPT) (见图 1), 获得时频域的基子带;

3) 在金字塔的第一层 (最高分辨率层) 嵌入模板。首先用密钥  $K_{t1}$  产生长度为  $N_t$  的 PN 序列, 并将其转化为  $\{+1, -1\}$  序列以用作待嵌入模板, 然后在靠近几何中心的区域用密钥  $K_{t2}$  选定  $N_t$  个系数用以模板的嵌入;

4) 为了进一步增强安全性, 将模板嵌入到由密钥  $K_{t3}$  确定的方向为  $\theta_t$  的子带中, 该子带通过可旋转特性插值而获得。但为了避免插值到该秘密方向子带并嵌入模板后再反插值回基子带的问题, 我们采用下列等价的、简化的嵌入方法:

$$\begin{aligned} u_0^1(x, y) &= q_0^1(x, y) + \beta_t t_k \cos(\theta_t) \\ u_1^1(x, y) &= q_1^1(x, y) - \beta_t t_k \sin(\theta_t) \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $q_i^1$  和  $u_i^1 (i = 0, 1)$  表示嵌入模板前后的时频域基子带,  $\beta_t$  是嵌入强度,  $t_k \in \{+1, -1\}$  是分配到该系数的模板信息比特。由于文献中现有的人类视

觉系统 (Human visual system, HVS) 模型不能很好地适配到 SPT 域, 因此本文在模板和水印嵌入中未采用 HVS 模型。

##### 3.1.2 水印的嵌入

为了避免模板和水印之间的相互干扰, 我们将水印嵌入在第二和三层; 同时为了增强鲁棒性, 只将水印嵌入在几何中心的 1/4 区域内。具体的嵌入方法如下:

1) 水印编码: 为了增强水印系统抗攻击的能力, 我们对原始信息进行信道编码。即对于长度为  $N_m$  比特的原始信息, 进行 1/3 卷积编码及载体长度为  $N_s$  的扩频编码, 产生  $N_w$  比特长的水印序列。其中, 卷积编码的生成矩阵为:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 向量树映射: 鉴于常规小波变换与可旋转小波变换具有相似的时频特性以及为了提高水印的检测性能, 我们将常规 (双) 正交小波域的隐马尔科夫模型 (Hidden Markov model, HMM)<sup>[27-28]</sup> 扩展到可旋转小波域 (即 SPT 变换域) 而获得 SPT 域的 HMM (SPT-HMM)。在 SPT-HMM 框架下, 变换系数是以四叉向量树的形式组织的, 如图 4 所示, 其中同一 SPT 分解层中具有相同位置的系数组合成一个向量。因此, 对于由第三层 (父层) 和第二层 (子层) 构成的向量树, 共有 10 个系数, 如图 5 所示。10 节点向量树是水印嵌入的基本单位。

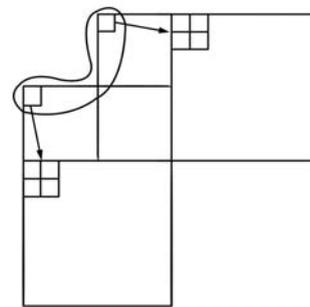


图 4 SPT 域向量 HMM 示意图

Fig.4 Illustration of HMM in the SPT domain

假定每棵向量树分配一个水印比特, 则需要将该比特映射成 10 比特的向量, 以对应 10 个系数的载体。根据文献 [28] 的研究结果, 有利于获得最好鲁棒性的映射方法如图 5 所示, 其中方框和三角形分别代表分配到该向量树的比特及其反相。

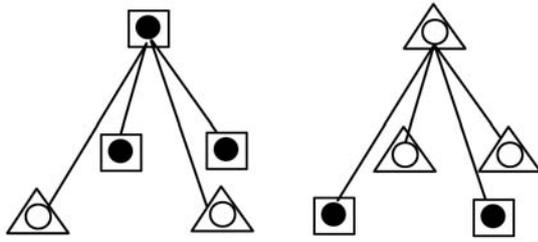


图 5 向量树映射方式

Fig. 5 Mapping method for vector tree

3) 构造向量树: 将第二和三层中央  $1/4$  区域的系数按图 4 的方式构造向量树. 假定每棵向量树嵌入一个水印比特, 则用密钥  $K_{w1}$  从所有向量树中选择  $N_w$  ( $N_w < H \times W/4$ ) 棵向量树.

4) 水印的嵌入: 为了进一步增强安全性, 假定水印嵌入在由密钥  $K_{w2}$  确定的方向  $\theta_i = K_{w2} + i\pi/2$  ( $i = 0, 1$ ) 子带中. 与模板嵌入类似, 为了避免两次插值, 简化后的等价嵌入方式为

$$\begin{aligned} u_0^1(x, y) &= q_0^1(x, y) + \beta_w p_0 \sin(\theta_0) - \beta_w p_1 \sin(\theta_1) \\ u_1^1(x, y) &= q_1^1(x, y) + \beta_w p_0 \cos(\theta_0) - \beta_w p_1 \cos(\theta_1) \end{aligned} \quad (19)$$

其中,  $q_i^l(x, y)$  和  $u_i^l$  ( $i = 0, 1; l = 2, 3$ ) 为水印嵌入前后的时频域基子带系数,  $\beta_w$  为水印嵌入强度,  $p_i$  为分配到该系数的、经映射后的比特.

5) 在嵌入完所有的水印比特后, 执行逆 SPT 变换, 接着再进行逆傅里叶变换, 获得嵌入模板和水印信息后的图像  $I_w(x, y)$ .

### 3.2 模板匹配

利用第 2 节推导的几何同步机制, 本节给出高效的、基于模板匹配的几何同步算法. 由于模板是在傅里叶变换的幅度中嵌入的, 因此模板具有平移不变性, 故模板匹配的主要目的是获得旋转和缩放的参数, 以便校正几何攻击而获得几何同步.

为了降低计算复杂度, 在模板匹配过程中, 我们只对潜在的模板点利用可旋转和可缩放特性进行插值, 而不是对所有系数都进行插值. 根据这一思路, 模板匹配的具体算法如下:

1) 将接收到的、可能受几何攻击后的图像进行傅里叶变换, 并提取傅里叶变换幅度.

2) 用 DMST (见图 1) 对傅里叶变换幅度进行一层的分解, 获得时频域基子带, 以进行模板匹配.

3) 设定旋转角度  $\theta$  的搜索范围为  $[0, 360)$ , 步长为  $\Delta\theta$ ; 缩放尺度  $\sigma$  的搜索范围为  $[\sigma_1, \sigma_2]$  (例如  $[0.5, 1.7]$ ), 步长为  $\Delta\sigma$ .

4) 搜索时初始化  $\theta = 0$ , 然后以  $\Delta\sigma$  的步长搜索  $[\sigma_1, \sigma_2]$  内的任一缩放尺度  $\sigma$ . 搜索完后, 令  $\theta =$

$\theta + \Delta\theta$ , 继续在  $[\sigma_1, \sigma_2]$  内搜索  $\sigma$ . 如此循环, 直至搜索完设定范围内的所有旋转角度和缩放尺度为止.

5) 对于搜索过程中任意的参数对  $(\theta, \sigma)$ , 按下述方式计算潜在的模板位置  $(x'_k, y'_k)$ :

$$\begin{aligned} x'_k &= \frac{x_k \cos(\theta) + y_k \sin(\theta)}{\sigma} \\ y'_k &= \frac{y_k \cos(\theta) - x_k \sin(\theta)}{\sigma} \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $(x_k, y_k)$  为根据密钥  $K_{t2}$  确定的模板的原始位置. 从对应  $(\theta, \sigma)$  的子带中提取对应潜在模板位置  $(x'_k, y'_k)$  的系数, 记为  $d^{\theta, \sigma}(x'_k, y'_k)$ . 其中子带  $d^{\theta, \sigma}$  是  $D^{\theta, \sigma}$  的逆傅里叶变换, 而  $D^{\theta, \sigma}$  则是对应  $(\theta, \sigma)$  的、经可旋转和可缩放特性插值得到的子带, 即

$$\begin{aligned} D^{\theta, \sigma}(r, \phi) &= s(\sigma)D_0(r, \phi) \cos(\theta) - \\ & s(\sigma)D_1(r, \phi) \sin(\theta) \end{aligned} \quad (21)$$

上式中的  $D_i(r, \phi)$  是 DMST 一层分解的基子带;  $s(\sigma)$  是可缩放插值函数, 如式 (10) 所示.

然而, 式 (10) 中的插值函数是针对 SPT 时频域信号的傅里叶变换系数的分段插值函数, 而 SPT 时频域的坐标位置与它对应的傅里叶变换域的坐标位置没有直接的关系, 因此式 (10) 意味着为了获取有限的潜在模板系数, 必须在搜索过程中反复执行傅里叶变换, 这显然会大大增加计算复杂度. 考虑到在缩放尺度的搜索范围为  $[0.5, 1.7]$  时, 对应  $r \in (\pi/4, \pi/2)$  的  $s(\sigma)$  的取值范围为  $[0.92, 1.13]$ , 对应  $r \in [\pi/2, \infty)$  的  $s(\sigma) = 1$ , 对应  $r \in (0, \pi/4]$  的  $s(\sigma)$  可取任意的值, 因此为了减小由于频繁傅里叶变换引起的计算复杂度, 我们近似地令  $s(\sigma) \approx 1$ , 则根据式 (21) 可得

$$\begin{aligned} d^{\theta, \sigma}(x'_k, y'_k) &= d_0(x'_k, y'_k) \cos(\theta) - \\ & d_1(x'_k, y'_k) \sin(\theta) \end{aligned} \quad (22)$$

第 4 节的实验结果表明, 这种简化方法是可行的.

6) 对于提取的潜在模板系数  $d^{\theta, \sigma}(x'_k, y'_k)$ , 计算它与由密钥  $K_{t1}$  确定的原始模板的相关值  $Corr(\theta, \sigma)$ .

7) 搜索完所有的  $(\theta, \sigma)$  后, 对应最大  $Corr(\theta, \sigma)$  的旋转和缩放参数就当作为模板匹配的结果, 即获得图像所受旋转和缩放攻击的参数.

此外, 为了加快搜索速度, 我们采用由粗到精的搜索方法, 即先用较大的步长以较快的速度逼近真值, 然后再以较小的步长进行搜索以获得精确的参数. 具体算法如下:

1) 在粗搜索的时候, 设置较大的搜索步长, 如  $\Delta\theta_c = 1^\circ$  和  $\Delta\sigma_c = 0.01$ , 得到  $(\theta_c, \sigma_c)$ ;

2) 在精搜索的时候, 设置较小的搜索步长, 如  $\Delta\theta_f = 0.1^\circ$  和  $\Delta\sigma_f = 0.002$ . 同时设置搜索范围为  $\theta \in [\theta_c - 1, \theta_c + 1]$  和  $\sigma \in [\sigma_c - 0.01, \sigma_c + 0.01]$ . 最后, 得到精估参数  $(\theta_f, \sigma_f)$ .

### 3.3 水印的检测

#### 3.3.1 基于可旋转小波域 HMM 的最优检测器

为了获得平移不变性和可旋转特性, SPT 放弃了常规小波的 (双) 正交约束, 但它与常规小波变换具有很相似的时频特性, 因此常规小波域向量隐马尔科夫模型 (HMM)<sup>[27-28]</sup> 可以扩展到旋转小波域而得到可旋转小波域的向量隐马尔科夫模型 (SPT-HMM). 对于图 1 所示的 SPT, 它有两个方向子带, 因此 SPT-HMM 框架下的 SPT 系数可按图 4 所示的方式来组织. 即同一层中不同方向子带同一位置的系数组合成一个向量, 以捕获同一层不同方向子带间的统计依赖关系; 层与层之间小波系数的统计依赖关系, 则通过一阶马尔科夫链来表征. 因此, SPT 可以用一组包含隐状态分布统计量 (如均值、协方差)、父层各隐状态的概率以及层间隐状态转移概率等参数所组成的模型参数集  $\Theta$  来表征<sup>[28]</sup>. 对于给定的 SPT 系数, SPT-HMM 的模型参数集  $\Theta$  可以通过 EM 算法<sup>[27-28]</sup> 来有效估计.

既然 SPT-HMM 能很好地刻画 SPT 域的系数, 那么我们可以利用 SPT-HMM 推导最优检测器, 以提高水印的检测性能. 假设  $\mathbf{Y}_k$  是待检测的向量树 (见图 4),  $\mathbf{P}_b$  是由分配到此向量树的比特  $b$  ( $b = 0, 1$ ) 经向量树映射 (见图 5) 而获得的映射向量, 则根据最大似然准则, 基于 SPT-HMM 模型参数  $\Theta$  的最优检测器可以构造如下:

$$\ln f_T(\mathbf{Y}_k - \beta_w \mathbf{P}_0 | \Theta) \stackrel{b=0}{>} \ln f_T(\mathbf{Y}_k - \beta_w \mathbf{P}_1 | \Theta) \quad (23)$$

其中,  $f_T(\cdot)$  是针对给定向量树  $\mathbf{T}$  的似然函数<sup>[27-28]</sup>,  $\beta_w$  是嵌入强度. 式 (23) 表明, 如果不等式左边大于右边, 则嵌入的水印判决为 0; 否则, 判决为 1.

#### 3.3.2 水印检测

在水印检测前, 首先用模板匹配算法获得的旋转和缩放参数校正原始图像, 然后对校正后的图像进行离散傅里叶变换. 接着, 对提取的傅里叶变换幅度进行三层的 SPT 变换, 并从第二和三层中提取水印. 具体的水印检测算法如下:

- 1) 利用可旋转特性, 分别插值出方向  $\theta_i = K_{w2} + i\pi/2$  ( $i = 0, 1$ ) 的子带, 其中  $K_{w2}$  是密钥;
- 2) 利用第二和三层方向为  $\theta_i$  的子带的中心  $1/4$  的区域构造如图 4 所示的向量树;
- 3) 利用密钥  $K_{w1}$  选择  $N_w$  棵向量树. 根据嵌入流程可知, 用  $K_{w1}$  所选向量树的坐标是针对子带

的, 因此对于方向  $\theta_i$  的子带, 密钥所选向量树坐标也需相应地旋转  $\theta_i$ , 然后再根据旋转后的坐标选取  $N_w$  棵向量树;

4) 对于每一棵向量树, 应用式 (24) 表示的基于 SPT-HMM 的最优检测器进行水印检测;

5) 在完成所有  $N_w$  棵向量树的检测后, 将检测到的水印序列进行解扩频和解卷积, 从而获得原来嵌入的信息.

## 4 实验结果与分析

本节通过实验仿真的方式评估本文所提出的算法. 在实验仿真中, 我们采用水印嵌入前后图像的峰值信噪比 (Peak signal-to-noise ratio, PSNR) 来衡量水印图像的质量, 并用提取到的比特串与原始比特串之间的比特误差率 (Bit error rate, BER) 来评估水印检测性能. 下面给出实验参数设置以及抵抗一般信号处理攻击、全局几何攻击及其联合攻击的鲁棒性能. 对于这些攻击, 都要利用模板及基于 DMST 的几何同步机制来识别几何参数, 但为避免重复以及为更好地说明由粗到精的模板匹配算法的效果, 我们将主要在第 4.3 节抵抗全局几何变换和一般信号处理联合攻击的过程中给出详细的模板匹配结果.

### 4.1 实验参数设置

在实验中, 我们测试了 20 幅  $512 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$ 、具有不同纹理特征的灰度图像. 对于每幅图像的傅里叶变换幅度, 首先用可旋转金字塔变换 (SPT) 进行三层的分解, 然后在第一层 (最高分辨率层) 中嵌入  $N_t$  个随机比特组成的模板; 考虑到模板随机比特数太少不利于鲁棒性, 而太多则会引起较大的失真, 经过实验对比分析后, 我们采用  $N_t = 100$ , 以获得较好的鲁棒性和失真折衷. 接着在第二和三层中嵌入  $N_w = 3015$  比特的编码水印序列, 它是通过将  $N_m = 60$  的有意义比特串经过  $1/3$  卷积码和  $N_s = 15$  的扩频后得到的. 实验中, 模板和水印的嵌入强度  $\beta_t$  和  $\beta_w$  根据不同图像而作不同的设置, 以便获得良好的视觉效果. 图 6 给出了其中 5 幅嵌入水印后的图像及它们的峰值信噪比 (PSNR), 图 6 表明水印图像具有较好的视觉质量. 所有 20 幅水印图像的平均 PSNR 为 39.49 dB, 方差为 0.41.

### 4.2 抗单项攻击性能

对水印图像的攻击包括常见信号处理攻击 (如 JPEG 压缩、加噪、中值滤波等) 和几何攻击 (如旋转、缩放等), 本小节评估本文算法对这两类攻击中的各种单项攻击的鲁棒性能. 首先, 我们评估本文算法抵抗常见信号处理单项攻击的性能. 即利用

StirMark 4.1<sup>[29-30]</sup> 对第 4.1 节中生成的水印图像实施 JPEG 压缩攻击, 其中 JPEG 压缩的质量因子 (Quality factor, QF) 设为 10~30, 随后利用第 3 节给出的算法进行模板匹配和水印检测. 图 7 给出了对 20 幅水印图像进行水印检测的平均比特误差率 (BER) 性能, 根据图像性能及 JPEG 压缩的特点可知, 当  $rmQF > 20$  时  $BER = 0$ , 这表明本文算法对 JPEG 压缩攻击具有良好的鲁棒性. 此外, 实验仿真表明, 当 BER 为 0 时, 模板匹配结果均得到旋转角度 0 和缩放因子 1, 即正确地识别到几何变换参数; 当 BER 不为 0 时, 则可能是由于模板匹配不正确或者模板匹配正确但水印检测出现错误.



(a) Tank (PSNR = 39.71 dB)



(b) Globe (PSNR = 39.42 dB)



(c) Lena (PSNR = 39.31 dB)



(d) Man (PSNR = 39.71 dB)



(e) Zelda (PSNR = 39.70 dB)

图 6 嵌入水印后的图像  
Fig. 6 Watermarked images

对第 4.1 节中生成的水印图像进行加性高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWGN) 攻击, 其中 StirMark 4.1 中的参数设置为 1~6. 用第 3 节介绍的算法得到的水印检测性能如图 8 所示,

由图 8 可知本文算法能较好抵抗加噪攻击. 此外, 利用 StirMark 4.1 进行中值滤波, 所有测试图像都能成功抵抗  $3 \times 3$  模板的中值滤波, 少数几幅图像能抵抗  $5 \times 5$  模板的中值滤波. 而对于高斯滤波和锐化攻击, 则所有测试图像都能成功抵抗. 上述这些实验结果表明, 本文算法对于常见信号处理攻击具有较好的鲁棒性.

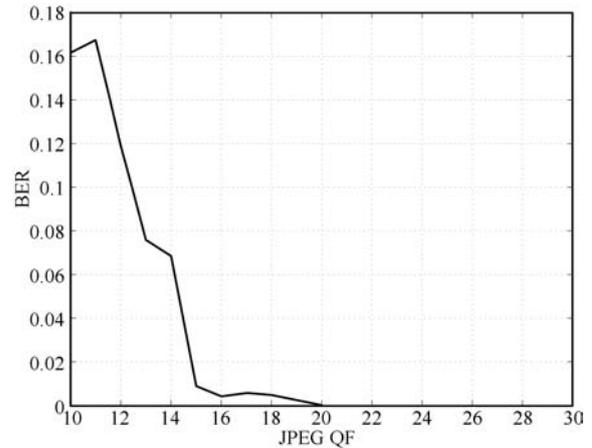


图 7 抗 JPEG 压缩平均 BER 性能  
Fig. 7 Performance against JPEG compression attack

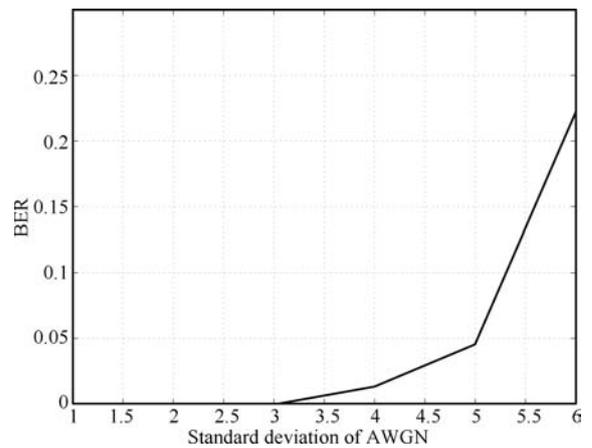


图 8 抗加噪攻击平均性能  
Fig. 8 Average performance against additive noise

进一步, 我们测试本算法抗单项几何攻击的性能. 对水印图像进行的单项几何攻击, 包括旋转后裁剪到原图大小 (RotCrop)、旋转后裁剪去空白部分并放大到原图大小 (RotScale) 及缩放 (Scaling) 等. 其中, RotCrop 和 RotScale 攻击均采用 StirMark 4.1 中的缺省参数  $\{\pm 2, \pm 1, \pm 0.75, \pm 0.5, \pm 0.25\}$ , 这是因为这些参数引起失真很小但却较难抵抗; Scaling 的参数为 StirMark 4.1 中的缺省参数  $\{0.5, 0.75, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0\}$ . 对于 RotCrop 和 RotScale 这两项攻击, 所有测试图像均能成功抵抗

并无误地恢复原始信息. 对于 Scaling 攻击, 20 幅测试图像的平均水印检测性能如图 9 所示. 由图 9 可知, 除缩放因子 2.0 外的其他缩放因子都具有良好的性能. 缩放因子 2.0 时的性能之所以较差, 是由于我们为简化式 (21) 的计算而假定缩放因子的范围为 [0.5, 1, 7] (见第 3.2 节), 因而当缩放因子为 2.0 时这种简化处理会带来性能的下降. 综合上述这些性能可知, 本文算法对于单项几何攻击具有良好的鲁棒性.

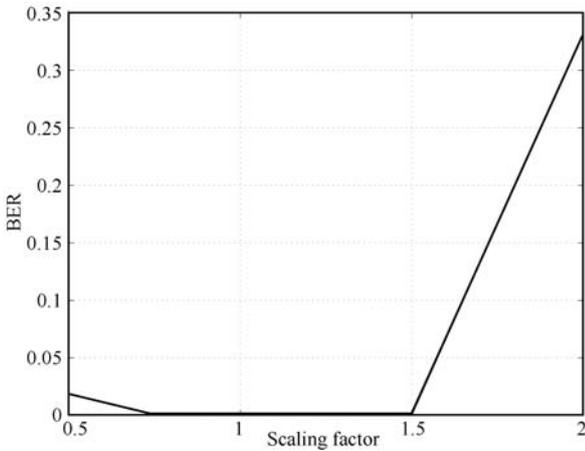


图 9 抗缩放攻击平均性能  
Fig. 9 Average performance against the value-metric attack

### 4.3 抗联合攻击的性能

为了进一步评估本文算法的性能, 我们对第 4.1 节中生成的水印图像实施常规信号处理和全局几何变换的联合攻击. 即嵌入水印后的图像先旋转  $10^\circ$ , 然后再放大到原图大小的 1.13 倍, 接着进行常规信号处理攻击, 最后对受攻击后的图像采用第 3 节中的算法进行模板匹配和水印检测. 考虑到现实应用中涉及的、比较重要的常规信号处理攻击主要是 JPEG 压缩和加噪, 因此下面主要针对这两项攻击和全局几何变换联合攻击的性能进行测试.

为验证联合攻击情况下模板匹配算法的有效性, 我们以图像 Lena 为例. 首先, 我们对嵌入水印后的 Lena 图像实施  $10^\circ$  的旋转、1.13 倍的放大以及 QF = 33 的 JPEG 压缩. 然后, 我们利用本文第 3 节中的模板匹配算法, 在粗搜索时得到旋转角度和缩放参数分别为  $\theta_c = 10.1$  和  $\sigma_c = 1.14$ , 在精搜索时则分别为  $\theta_f = 10.1$  和  $\sigma_f = 1.13$ . 随后以精搜索得到的参数校正受攻击图像, 并用本文第 3.3 节的方法提取水印; 实验结果表明可以无误地恢复嵌入的原始信息. 这表明第 3 节的模板匹配算法和水印提取算法是合理的和可行的.

对所有测试水印图像均旋转  $10^\circ$  和放大 1.13

倍后, 再进行 JPEG 压缩和加噪, 20 幅测试图像的平均检测性能分别如图 10 和图 11 所示. 根据实验结果可知, 本文算法能较好地抵抗全局几何变换和 JPEG 压缩的联合攻击; 但对全局几何变换和加噪联合攻击性能则差一些, 这主要可能是加噪引起傅里叶变换幅度系数的变化较大, 从而使得模板匹配出现误判.

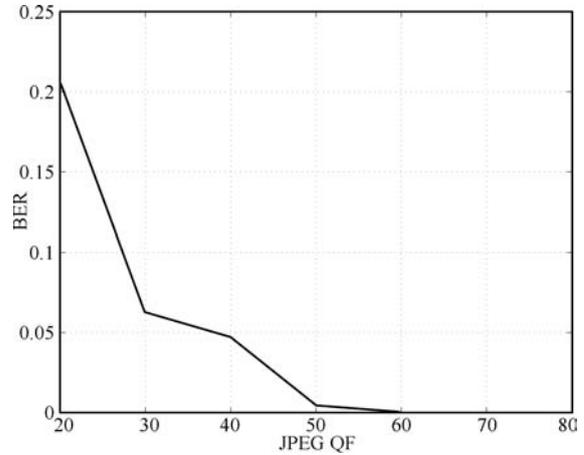


图 10 抗旋转、缩放和 JPEG 联合攻击平均性能  
Fig. 10 Average performance against the joint attacks of rotation, resizing and JPEG compression

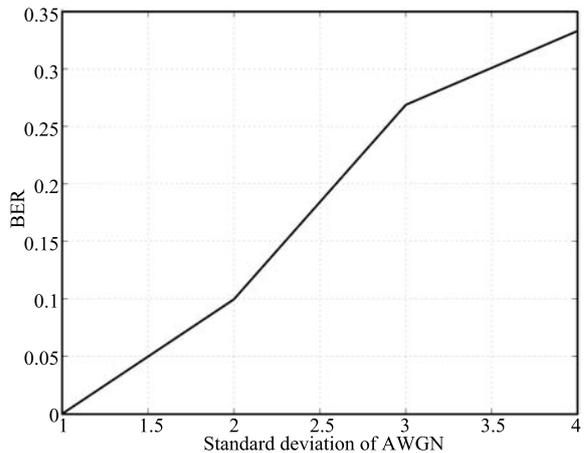


图 11 抗旋转、缩放和加噪联合攻击平均性能  
Fig. 11 Average performance against the joint attacks of rotation, resizing and additive noise

### 4.4 性能比较

为了进一步评估本文算法的性能, 我们将本文算法与其他采用模板的算法进行性能比较. 根据近期的综述文献 [8], 采用模板的典型算法是 Pereira 等提出的抗仿射变换的鲁棒水印算法<sup>[23]</sup>; 而近期基于模板同时抵抗旋转、缩放和平移的算法较少, 因此本节中我们将本文算法与基于模板的典型算法<sup>[23]</sup>

进行比较. 为公平比较, 我们将本文算法和文献 [23] 中的算法所生成图像的 PSNR 值设置成近似一致, 然后再分别比较它们的鲁棒性能. 具体来说, 实验中我们采用如下的、与文献 [23] 相同的实验仿真方式: 采用 Baboon, Lena 和 Boat 三幅 512 像素  $\times$  512 像素的灰度图像, 将 PSNR 设置为 38 dB, 利用 StirMark 3<sup>[29-30]</sup> 对水印图像实施常规信号处理攻击和几何变换攻击. 对于每一种攻击测试, 我们均采用 StirMark 3 中的缺省参数; 本文算法和文献 [23] 算法抗 StirMark 3 攻击性能汇总于表 1.

表 1 本文算法和文献 [23] 算法抗 StirMark3 各类攻击平均性能比较 (增强攻击包括高斯滤波、中值滤波、锐化和 FMLR<sup>[29-30]</sup>; 所有攻击类型的参数均为 StirMark 3 中所给出的缺省参数. 对每一个缺省参数, 若无误恢复原始信息则结果记为 1, 否则记为 0; 对所有同类攻击测试求平均结果后得到表中的性能.)

Table 1 Performance comparison between the proposed scheme and the one in [23] against the attacks in StirMark3 (Enhancement includes Gaussian filtering, median filtering, sharpening and FMLR<sup>[29-30]</sup>. In the simulation, the default settings in StirMark 3 are adopted for all attacks. For each parameter in the default settings, score 1 is set if the message can be correctly recovered and 0 otherwise. These scores are finally averaged to yield the results in Table 1.)

攻击类型	文献 [23] 算法	本文算法
增强	1	1
JPEG 压缩	0.74	0.94
旋转	1	1
缩放	0.78	0.83
裁剪	0.83	0.79

由表 1 可知, 本文算法和文献 [23] 的算法对增强 (包括高斯滤波、中值滤波、锐化和 FMLR<sup>[29-30]</sup>) 攻击和旋转攻击具有相同的性能; 对于 JPEG 压缩, 本文算法相对于文献 [23] 的算法有大幅的性能提升; 对于缩放, 本文算法的鲁棒性能略好于文献 [23] 算法的性能. 但对于抗裁剪性能, 本文算法略差于文献 [23] 的算法, 这主要是由于经受较大尺寸的裁剪 (如大于 50% 的裁剪) 后傅里叶幅度发生较大的变化而导致模板匹配时容易错判.

此外, 由于 DMST 本身的特性, 本文算法只能抵抗全局几何攻击, 而无法抵抗诸如仿射变换、去除图像的行或列、剪切 (Shearing) 等几何攻击. 因此, 表 1 没有列出本文算法抵抗这些几何攻击的性能; 但文献 [23] 的算法能较好抵抗这些几何攻击.

#### 4.5 算法复杂度分析

本文算法包括嵌入和检测两部分. 根据第 3 节, 本文算法的嵌入部分及检测部分的水印提取都相对简单, 因此本小节我们主要分析检测部分的模板匹配算法的复杂度. 根据第 3.2 节给出的模板匹配算法, 在粗搜索阶段的计算复杂度为  $O((360/\Delta\theta_c) \times ((\sigma_1 - \sigma_0)/\Delta\sigma_c))$ , 在精搜索阶段的为  $O((2/\Delta\theta_f) \times (0.02/\Delta\sigma_f))$ , 其单位为  $N_t$  个模板系数的相关运算. 因此, 总的计算复杂度可以估计为  $O((360/\Delta\theta_c) \times ((\sigma_1 - \sigma_0)/\Delta\sigma_c) + (2/\Delta\theta_f) \times (0.02/\Delta\sigma_f))$ .

在实验中, 我们设置  $\sigma_1 = 0.5$ ,  $\sigma_2 = 1.7$ ,  $\Delta\theta_c = 1^\circ$ ,  $\Delta\sigma_c = 0.01$ ,  $\Delta\theta_f = 0.1^\circ$ ,  $\Delta\sigma_f = 0.002$  和  $N_t = 100$ , 用 Matlab 6.5 实现第 3.2 节的模板匹配算法, 并在具有 Intel Core™ 2 Duo 2.2 GHz CPU 和 2 G 内存的个人计算机上进行仿真. 经过 10 次的仿真, 模板匹配所花费的平均计算时间为 6.8 秒. 这表明本文算法具有可行的计算时间.

## 5 结论

本文在可旋转金字塔变换 (SPT) 的基础上设计了具有平移不变性、可旋转和可缩放特性的可变形多尺度变换 (DMST), 并利用 DMST 的几何可变形特性提出了一种新的几何不变鲁棒图像水印算法. 根据联合几何可变形特性 (Joint shiftability) 的相关理论, 本文把 SPT 的可旋转分析滤波器扩展成可变形 (即可旋转和可缩放) 滤波器, 从而获得非对称的 DMST, 即同时具有可旋转的分析和综合滤波器, 但只具有可旋转和可缩放的分析滤波器. 基于 DMST 的几何可变形特性, 本文从理论上推导出了几何同步机制, 并用以设计平移、旋转和缩放不变的鲁棒数字水印算法. 其中, 平移不变性通过在输入图像的傅里叶幅度中嵌入和检测水印来实现; 而旋转和缩放不变性, 主要通过可旋转和可缩放特性并辅助于模板来识别旋转和缩放参数, 然后再基于此参数进行几何校正.

本文所提出的鲁棒数字水印算法, 在嵌入端利用 SPT 实现水印及模板的嵌入和检测; 在检测端则首先利用 DMST 的可旋转和可缩放特性通过模板匹配而估计旋转和缩放参数, 然后利用此参数进行几何校正, 最后再次利用 SPT 实现水印的检测. 其中, 为了提高水印的检测性能, 本文亦将常规小波域的隐马尔科夫模型扩展到可旋转小波域. 实验表明, 本文所提出的算法能很好地抵抗常规信号处理攻击、全局几何攻击以及它们之间的联合攻击.

## References

- 1 Cox I J, Miller M L, Bloom J A. *Digital Watermarking*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002

- 2 Simoncelli E P, Freeman W T, Adelson E H, Heeger D J. Shiftable multi-scale transform. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, **38**(2): 587–607
- 3 Freeman W T, Adelson E H. The design and use of steerable filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(9): 891–906
- 4 Perona P. Deformable kernels for early vision. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Maui, USA: IEEE, 1991. 222–227
- 5 Perona P. Deformable kernels for early vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, **17**(5): 488–499
- 6 Karasaridis A, Simoncelli E. A filter design technique for steerable pyramid image transforms. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Atlanta, USA: IEEE, 1996. 2387–2390
- 7 Portilla J, Strela V, Wainwright M J, Simoncelli E P. Image denoising using scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, **12**(11): 1338–1351
- 8 Zheng D, Liu Y, Zhao J, Saddik A E. A survey of RST invariant image watermarking algorithms. *ACM Computing Surveys*, 2007, **39**(2): Article No. 5
- 9 Liu Jiu-Fen, Huang Da-Ren, Huang Ji-Wu. Survey on watermarking against geometric attack. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, **26**(9): 1495–1503  
(刘九芬, 黄达人, 黄继武. 图像水印抗几何攻击研究综述. 电子与信息学报, 2004, **26**(9): 1495–1503)
- 10 Yuan Da-Yang, Xiao Jun, Wang Ying. Study on the robustness of digital image watermarking algorithms to geometric attacks. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, **30**(5): 1251–1256  
(袁大洋, 肖俊, 王颖. 数字图像水印算法抗几何攻击鲁棒性研究. 电子与信息学报, 2008, **30**(5): 1251–1256)
- 11 ORuanaidh J J K, Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. *Signal Processing*, 1998, **66**(3): 303–317
- 12 Kim H S, Lee H K. Invariant image watermark using Zernike moments. *IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology*, 2003, **13**(8): 766–775
- 13 Tang C W, Hang H M. A featured-based robust digital image watermarking scheme. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, **51**(4): 950–959
- 14 Teague M. Image analysis via the general theory of moments. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, **70**(8): 920–930
- 15 Zhang H, Shu H, Coatrieux G, Zhu J, Wu Q M, Zhang Y, Zhu H, Luo L. Affine Legendre moment invariants for image watermarking robust to geometric distortions. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(8): 2189–2199
- 16 Xiang S, Kim H J, Huang J. Invariant image watermarking based on statistical features in the low-frequency domain. *IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology*, 2008, **18**(6): 777–790
- 17 Kutter M. Watermarking resistance to translation, rotation, and scaling. In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering: Multimedia Systems and Applications. Boston, USA: SPIE, 1998. 423–431
- 18 Voloshynovskiy S, Deguillaume F, Pun T. Content adaptive watermarking based on a stochastic multiresolution image modeling. In: Proceedings of the 10th European Signal Processing Conference. Tampere, Finland: Eurasp, 2000. 5–8
- 19 Voloshynovskiy S, Deguillaume F, Pun T. Multibit digital watermarking robust against local nonlinear geometrical distortions. In: Proceedings of the International Conference on Image Processing. Thessaloniki, Greece: IEEE, 2001. 999–1002
- 20 Bas P, Chassery J M, Macq B. Geometrically invariant watermarking using feature points. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(9): 1014–1028
- 21 Tsai J, Huang W B, Kuo Y H. On the selection of optimal feature region set for robust digital image watermarking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(3): 735–743
- 22 Deng Cheng, Li Jie, Gao Xin-Bo. Geometric attacks resistant image watermarking in affine covariant regions. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 221–228  
(邓成, 李洁, 高新波. 基于仿射协变区域的抗几何攻击图像水印算法. 自动化学报, 2010, **36**(2): 221–228)
- 23 Pereira S, Pun T. Robust template matching for affine resistant image watermarks. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, **9**(6): 1123–1129
- 24 Kang X, Huang J, Shi Y Q, Lin Y. A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to both affine transform and JPEG compression. *IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology*, 2003, **13**(8): 776–786
- 25 Ni J, Wang C, Huang J, Zhang R. A RST-invariant robust DWT-HMM watermarking algorithm incorporating Zernike moments and template. In: Proceedings of the 9th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Melbourne, Australia: Springer, 2005. 1233–1239

- 26 Xu Zi-Han, Wang Xiang-Yang. An SVR based image watermarking detection algorithm against geometric attacks. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(1): 23–27  
(徐紫涵, 王向阳. 可有效抵抗一般性几何攻击的数字水印检测方法. *自动化学报*, 2009, **35**(1): 23–27)
- 27 Crouse M S, Nowak R D, Baraniuk R G. Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, **46**(4): 886–902
- 28 Ni J, Zhang R, Huang J, Wang C. A robust multi-bit image watermarking algorithm based on HMM in wavelet domain. In: *Proceedings of the 4th International Workshop on Digital Watermarking*. Siena, Italy: Springer, 2005. 110–123
- 29 Petitcolas F A P. Watermarking schemes evaluation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2000, **17**(5): 58–64
- 30 StirMark [Online], available: <http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/stirMark/>, September 8, 2011

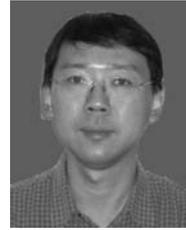


**王春桃** 华南农业大学信息学院讲师. 2002 和 2007 年在中山大学分别获得学士和博士学位. 2007 至 2010 年先后在韩国高丽大学及中山大学做博士后研究. 主要研究方向为信息隐藏和多媒体信号处理. 本文通信作者.

E-mail: wct2006@gmail.com

(**WANG Chun-Tao** Lecturer at the College of Informatics, South China Agricultural University. He received his B.S. and Ph.D. degrees from Sun Yat-Sen University in 2002 and 2007, respectively. From 2007 to 2010, he was a postdoctoral fellow in Korea University, Korea and Sun Yat-sen University, China, respectively. His research interest covers information hiding and

multimedia signal processing. Corresponding author of this paper.)



**倪江群** 中山大学信息科学与技术学院教授. 1998 年在香港大学获博士学位. 主要研究方向为多媒体信号处理和通信, 多媒体信息隐藏和取证, 数字电视关键技术, 嵌入式系统及应用.

E-mail: issjqni@mail.sysu.edu.cn

(**NI Jiang-Qun** Professor at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University. He received his Ph. D. degree from University of Hong Kong in 1998. His research interest covers multimedia signal processing and communication, information hiding and forensics, key technology of digital television, and embedded system and applications.)



**卓华硕** 硕士研究生. 2009 年于中山大学信息与科学技术学院获得学士学位. 主要研究方向为数字水印和信息隐藏.

E-mail: zhs\_13119535189@126.com

(**ZHUO Hua-Shuo** Master student. He received his bachelor degree from Sun Yat-Sen University in 2009. His research interest covers digital watermarking and information hiding.)



**黄继武** 博士, 中山大学信息科学与技术学院教授. 主要研究方向为多媒体信息安全.

E-mail: issjhjw@mail.sysu.edu.cn

(**HUANG Ji-Wu** Ph.D., professor at Sun Yat-Sen University. His main research interest is multimedia information security.)