

基于 FFT 域的手机彩信盲检测图像水印

伍宏涛¹, 朱柏承¹, 杨义先²

(1. 北京大学电子学系, 北京 100871; 2. 北京邮电大学信息工程学院, 北京 100876)

摘 要: 移动通信的发展使得手机彩信广泛使用, 针对彩信图像的数字权利管理, 提出了基于 FFT 域的高容量、强鲁棒性、盲检测图像水印算法。该算法对图像亮度矩阵的频谱幅度采样点的大小关系进行调制, 可以抵抗图像长宽不等任意缩放、图像基本旋转、格式转换以及常规图像处理攻击等对水印系统的影响。该算法运用 FFT 变换的感知模型, 采用自适应的通知编码和通知嵌入技术, 控制了水印嵌入的增益, 提高图像的保真度, 增强抵抗攻击的能力。实验证明, 该算法是有效的, 可以满足实时计算的要求。

关键词: 图像水印; 几何变换; 盲检测; 通知编码; 通知嵌入

中图分类号: TN 929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 07-1236-05

FFT-Based Image Watermarking in Mobile Color Message with Blind Extraction

WU Hong-tao¹, ZHU Bo-cheng¹, YANG Yi-xian²

(1. Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. College of Information Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Mobile color message is popular used in rapidly development of mobile communication. For digital right management (DRM) of color message, the image watermarking algorithm is proposed that can be blind extracted with high capacity and strong robustness in FFT domain. It modulate the watermark information in the magnitude relationship of spectrum amplitude sampling points with resistance to random scale, basic rotation, transform of format and general image processing, etc. The algorithm use FFT based apperception model and adaptive informed coding and embedding technique to improve the fidelity and robustness while the overflow has been controlled. The results prove its effective and can calculate in real time.

Key words: image watermark; geometry transform; blind extraction; informed code; informed embed

1 引言

当前移动通信迅猛发展, 在移动网络中使用的图片、铃声、游戏、资讯等出现大量的未授权使用。作为版权保护的数字水印^[1]在移动网络中的应用日益重要。目前, 各行业实际需求下的水印应用系统^[2]的研究正蓬勃发展, 而彩信水印的版权保护则要求水印的容量, 需要同时解决几何变换和信号处理等攻击下的水印设计问题, 在无误码的情况下需要完全的盲检测方案。

满足全面的需求是具有挑战性的, 这是因为水印算法无法在对几何攻击进行补偿的基础上, 在高容量、盲检测和鲁棒性之间满足所有需求。由于彩信市场的快速发展, 彩信的版权保护已迫在眉睫, 对彩信水印的需求越来越细

致。在移动通信网络的复杂应用环境下, 不同的手机终端接收或者转发的彩信图像必然受到手机的制约, 彩信图像匹配手机显示屏造成的图像的任意放缩和 90、180、270 度任意基本旋转, 类似 RST (Rotation, scale and translation) 变换^[3,4]的攻击, 调色板图像的调色板则可能会被置换成手机上的内置标准调色板。为了在手机终端实现基于水印技术的 DRM (Digital Right Manager), 必须有相应的水印算法支撑。

在研究抗几何变换的水印技术中, Lin C. Y., Wu M., Bloom J. A. et al^[3]对图像作 FM (Fourier Mellin) 变换, 再沿着坐标轴 $\log(r)$ 把幅度系数连加得到一维函数, 最后把水印加载到该函数上, 对水印图像的旋转和缩放攻击, 利用简单的搜索和相关检测度量来补偿, 算法实际嵌入的信

收稿日期: 2005-11-15; 修回日期: 2005-12-24

基金项目: 北京市自然科学基金 (No. 4062025)

息量只有 1bit O Ruanaidh, J. J. K.; Pun, T. [4]证明了对 FM 变换的结果再作 Fourier 变换,具备理论上的几何变换完全不变性,在 [5]中把水印嵌在 FM 变换域的幅值空间中,该算法的提取需要借助于原始图像。刘九芬,王振武,黄达人 [6]提出应用图像配准技术抵抗 RST 攻击,在 DWT 域隐藏多比特有意义水印,该算法把原始水印图像作为参考图像,与受到 RST 攻击的水印图像进行对数极坐标下的图像匹配,寻找可能的旋转、缩放和平移因子。M. Kutter [7]提出了一个通用算法,在图像的蓝色部分嵌入水印,因此实际应用时,可以看成空域算法;对待图像平移需要搜索匹配;对于几何变换,通过水印的多重嵌入计算变换前后至少两个参考点的位置信息,得到几何变换的参数;由于 S_i 的数目就是水印的容量,不重迭分割的面积对应鲁棒性,使得水印容量和水印鲁棒性构成矛盾;运算较为复杂。Pholsomboon S.; Vongpradhip S. [8]在 FFT 域嵌入了一个圆形的复指数函数水印,对待检测的图像,通过计算其频谱幅度加 1 后的对数值与设计的圆形复指数函数水印的相似值,判断是否存在水印,这种方法对水印的表现形式进行了发展,对图像的旋转和缩放攻击存在问题,没有说明虚警情况。

这些水印算法都存在一些问题,首先是 LPM 和逆 LPM 对图像质量的影响是非常大的,目前没有特别有效的补偿算法;其次,这类水印算法的嵌入容量不大,而且随着图像的像素点增多没有明显改善;再次,运算的复杂程度比较大;最后,部分算法属于非盲检测算法,水印的检测需要原始载体。

本文设计的水印算法是完全的盲检测,即使小到 101 × 80 像素的图像都可以隐藏 252bits,解决了图像长宽不等任意缩放、基本旋转 (90°; 180°; 270°) 对于水印系统的影响,灵活运用了通知编码和通知嵌入的技术,利用 FFT 域感知模型改善图像的品质,引入增益控制步骤降低算法本身的误差,基于 FFT 感知模型的改造与应用为算法嵌入水印的强度提供了定量的依据。

2 频谱幅度关系调制的几何变换不变性

Fung W. W. L., Kunisa A. [9]阐述了几何变换的不变性存在于 Fourier Mellin 变换,其中平移仅仅对相位产生影响,而旋转和缩放之后图像频谱幅度为

$$|I(f_x, f_y)| = |I(f_x \cos \theta + f_y \sin \theta, -f_x \sin \theta + f_y \cos \theta)|$$

进一步推导可以得到:对于数字图像的缩放和旋转变换,存在对应频谱幅度的关系不变性,即:如果原始图像的频谱在点 (x₁, y₁) 和 (x₂, y₂) 处存在关系

$$|I(f_{x_1}, f_{y_1})| > |I(f_{x_2}, f_{y_2})|$$

则在缩放和旋转变换之后

$$|I(f_{x_1}, f_{y_1})| > |I(f_{x_2}, f_{y_2})|$$

这里 $f_{x_2} = \frac{1}{s} (f_{x_1} \cos \theta + f_{y_1} \sin \theta)$, $f_{y_2} = \frac{1}{s} (-f_{x_1} \sin \theta + f_{y_1} \cos \theta)$, 为图像缩放因子, θ 为旋转角度,原始图像为 $i(x, y)$,其傅里叶变换为 $I(f_x, f_y)$,在几何攻击之后的图像记为 $i(x, y)$,其傅里叶变换为 $I(f_x, f_y)$ 。在没有旋转的情况下,可以将这个结果扩大到长宽不相等的任意放缩,取 s_x 和 s_y 为长宽不等的放缩因子,则 $|I(f_x, f_y)| = \frac{1}{s_x s_y} |I(\frac{1}{s_x} f_x, \frac{1}{s_y} f_y)|$ 。

我们决定在图像频谱幅度采样点的大小关系上调制水印信息,如果将旋转仅仅局限于 90、180 和 270 度旋转,缩放范围在容许范围之内,可以确保算法的盲检测性质。这是因为我们将比较一、二象限位置 (i, j) 和 (-j, i) 上的数值的大小,二者与原点构成 90 夹角。而频谱幅度是原点对称的,即一、三象限的 (i, j) 和 (-i, -j) 和二、四象限的 (-j, i) 和 (j, -i) 各自对应位置上的数值相等。所以,图像旋转 180° 频谱幅度没有变化;如果图像逆时针旋转 90° 或者 270° 而提取算法不变,算法仍然提取一、二象限位置 (i, j) 和 (-j, i) 上的数值的大小,此时该位置的数值为原频谱幅度位置 (j, -i)、(-j, i) 与 (i, j)、(-i, -j) 上数值所取代,因此频谱幅度的大小关系正好与嵌入后的大小关系相反,得到的水印比特将是反码。

3 详细算法设计

3.1 水印信息编码

我们要嵌入多比特的水印,首先要对水印进行编码,实现纠错和同步。首先,对包含水印长度信息的序列 W_{atemark} 进行卷积编码得到 cW; 其次,在序列 cW 的前面添加同步码,我们使用的同步码 syn(16) 长度为 16bits,得到 scW; 最后对 scW 进行通知编码 (informed code) [10], 得到 iscW, 我们实际嵌入载体的序列是 iscW。

3.2 嵌入算法

读入 N × M 大小的图像,不管是 24 位真彩、彩色索引图像、还是灰度图像,我们都计算图像的亮度矩阵 L; 将亮度矩阵 L 的数值线性转换到 -0.5 ~ 0.5 之间,得到矩阵 Y; 计算矩阵 Y 的 N × M 点的 FFT 变换 FY, 存储 angle (FY), 计算 FM = abs (FY)。如图 1 所示。

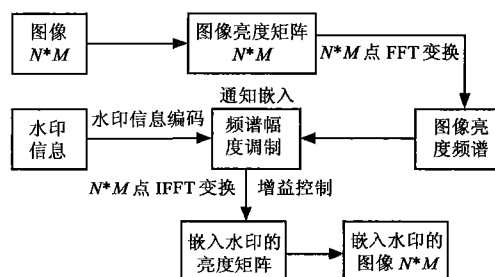


图 1 图像水印的嵌入过程

对 FM 进行频谱搬移,使频谱的零点为中心点,则频谱可以分成四个象限的数据,因为频谱是共轭对称的,所

以我们只比较一、二象限的频谱幅度. 任选第一象限的坐标 (i, j) , 与该点构成 90 直角的第二象限坐标为 $(-j, i)$, 我们将比较这两个对应位置的大小关系. 我们仅扫描第一象限满足条件 $n_1 \sqrt{i^2 + j^2} n_2$ 的坐标上的频谱幅度, 构成一维序列 $FM_1(k)$, 同时对应的第二象限的坐标上的频谱幅度也构成了等长的一维序列 $FM_2(k)$.

比较 $FM_1(k)$ 与 $FM_2(k)$ 的大小关系, 如果 $FM_1(k) > FM_2(k)$ 同时 $iscW(k) = 1$, 则修改 $FM_1(k)$ 的值

$$FM_1(k) = \max(FM_1(k), FM_2(k) + qd(k))$$

如果 $FM_1(k) > FM_2(k)$ 同时 $iscW(k) = 0$, 则修改 $FM_2(k)$ 的值

$$FM_2(k) = FM_1(k) + qd(k)$$

如果 $FM_1(k) < FM_2(k)$ 同时 $iscW(k) = 1$, 则修改 $FM_1(k)$ 的值

$$FM_1(k) = FM_2(k) + qd(k)$$

如果 $FM_1(k) < FM_2(k)$ 同时 $iscW(k) = 0$, 则修改 $FM_2(k)$ 的值

$$FM_2(k) = \max(FM_1(k) + qd(k), FM_2(k))$$

这里 $qd(k)$ 是由下节 FFT 变换的感知模型推导出来的嵌入强度因子.

需要注意的是任何幅度对数数值的修改, 都将在其共轭对称的位置作相应的修改, 保证修改后的频谱是共轭对称的. 这样我们得到了修改后的 FM .

将生成的新的频谱幅度矩阵 FM , 与预先存储的频谱相位合成复数频谱, 再做 IFFT 变换生成图像的亮度矩阵 Y ; 按照读入图像时获得的图像格式, 重新生成相同格式的图像文件.

3.3 提取算法

读入待检测水印的 $N_1 \times M_1$ 大小的图像, 计算图像的亮度矩阵 L ; 将亮度矩阵 L 的数值转换到 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, 得到矩阵 Y ; 计算矩阵 Y 的 $N_1 \times M_1$ 点 FFT 变换 FY , 计算 $\text{abs}(FY)$; 对 $\text{abs}(FY)$ 进行频谱搬移, 使频谱的零点为中心点, 以相同方式扫描顺序扫描第一象限 n_1

$\sqrt{i^2 + j^2} n_2$ 的所有采样点, 生成序列 $FM_1(k)$ 和 $FM_2(k)$; 需要注意的是如果待检测图像的大小 $N_1 \times M_1$ 与原始图像大小 $N \times M$ 不同, 我们的扫描方法和区间参数 $n_{1,2}$ 是不变的. 如图 2 所示.

比较比较 $FM_1(k)$ 和 $FM_2(k)$ 的大小关系, 如果

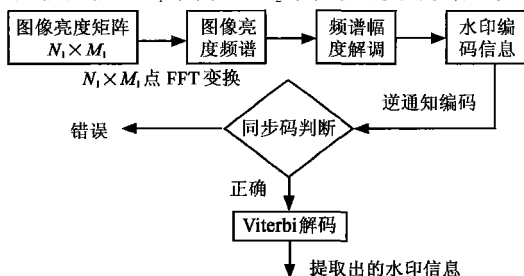


图 2 图像水印的提取过程

$FM_1(k) > FM_2(k)$ 则 $\text{extract_iscW}(i) = 1$

$FM_1(k) < FM_2(k)$ 则 $\text{extract_iscW}(i) = 0$

根据水印编码的顺序, 在 extract_iscW 中通过逆通知编码提取出水印同步码. 如果与设定的同步码完全一致, 则按照水印编码规则解码出最后的水印 W_{atemark} ; 如果提取的水印同步码与设定的同步码完全相反, 则将 extract_iscW 取反后再按照上述步骤解码出最后的水印 W_{atemark} .

3.4 通知编码与通知嵌入 (informed code and embedded)^[10]

作为带边信息通信的理论建议编码作为载体的函数, 因而, 每个消息映射为可以选择的码字集合, 然后选择由载体信息决定的码字嵌入, 称为通知编码. 类似地, 调制作为载体和嵌入信息的函数, 调制方式或者调制强度、以及调制的某些参数由载体以及嵌入的信息决定, 这样的调制方式称为通知嵌入.

我们在此算法中设计了一套全新的通知编码算法, 假设我们由 1bit 水印信息编码为 3bits 编码信息, 这样我们有 8 个不同的码字表示 0 和 1, 假设

000, 011, 101, 110——表示 0;

001, 010, 100, 111——表示 1;

这样的编码映射基本上没有纠错的能力, 但是它有一个好处, 就是可以只要修改码字中的任何一位比特数, 就可以由 0 转为 1 或者由 1 转为 0. 这种编码又可以称之为“综合症编码”(syndrome code)^[11].

因为要嵌入的序列的每个比特我们有 4 种不同的码字来表示, 所以我们有 4^N 种不同的表示序列, 记这个序列的总体为集合 X , 我们需要寻找这样的序列 $x \in X$, 使得 x 与载体本身特征的相关系数最大. 这个 x 就是我们需要的通知编码的结果.

我们嵌入比特信息是通过修改频谱幅度的大小关系, 采用的通知嵌入是在一个 n bits (例如 $n = 3$) 的编码分组里, 我们要么什么都不用修改, 要么只修改其中的一位, 我们将只修改在编码分组里频谱幅度最接近的两个位置, 按照嵌入算法中描述的修改方法进行修改. 这样做的目标是尽量减少修改的位置, 尽量减少修改的幅度, 这种修改方式称为通知嵌入.

3.5 基于 FFT 变换的感知模型

在视觉模型中, 蓝色的频率响应要低于其他响应, 因此很多彩色图像水印系统将大部分水印信号分配在蓝色信道中; 对于越亮的信号, 视觉敏感度越低, 其亮度敏感度是非线性的. 环境背景对感知过程造成的影响成为掩蔽, 在视觉模型中, 有频率掩蔽和亮度掩蔽. A. B. Watson^[12] 描述了一个基于 DCT 变换的视觉感知模型, 由敏感度函数、亮度掩蔽、对比度掩蔽以及合并部分组成. Watson 模型根据图像的块离散余弦变换 (DCT) 估计变化的可感知性, 然后将这些估计的结果合并成一个对感知距离的单个估计.

Watson 模型定义了一个频率敏感度表,表中的每一个元素 $t(i, j)$, $i, j \in [1, \dots, 8]$ 表示不存在任何掩蔽噪声的情况下,可被察觉的 DCT 系数的最小幅度。

我们将 DCT 频率敏感度表推广到 FFT 频率的敏感度,我们可以定义 FFT 的频谱幅度敏感度为

$$\begin{aligned} mt(i, j) &= mt\left(i \times \frac{2\pi}{N}, j \times \frac{2\pi}{M}\right) \\ &= k_1 \times t(x, y) \Big|_{(x, y) = (i \times \frac{2\pi}{N}, j \times \frac{2\pi}{M})} + k_2, \\ i &\in [1, \dots, N/2], j \in [1, \dots, M/2] \end{aligned}$$

定义强度隐蔽公式为

$$mtl(i, j) = k_3 \times mt(i, j) \times |F(i, j)|^{k_4}$$

频谱幅度的隐蔽阈值公式为

$$smtl(i, j) = \max(mtl(i, j), |F(i, j)|^{k_5} mtl(i, j)^{1-k_5})$$

在嵌入算法中,我们提出了水印嵌入的强度因子: $qd(i)$ (i 为扫描顺序),假设对应 i 的隐蔽阈值为 $smtl(i)$,我们取

$$qd(i) = k_6 \times smtl(i)$$

这里 k_6 与算法的鲁棒性相关,可以通过试验来确定。

3.6 增益控制

增益控制是算法中鲁棒性增强的步骤。图像亮度矩阵的数值,首先平移到 $[-0.5, 0.5]$ 的区间,在经过嵌入水印的步骤之后,其取值的范围应该还在 $[-0.5, 0.5]$ 的区间,否则超出的部分将会被截去,这种截去带来的误差对于基于 FFT 变换的算法影响是很大的。

我们在水印嵌入之后的图像亮度矩阵 $L(i, j)$ $[-0.5, 0.5]$ 中,计算其最大值 $M = \max_{i,j}(L(i, j))$ 和最小值 $m = \min_{i,j}(L(i, j))$,设 $a = \max(\text{abs}(M), \text{abs}(m))$,如果 $a > 0.5$,则令 $L(i, j) = L(i, j) \times \frac{0.5}{a}$,这样就可以满足 $L(i, j) \in [-0.5, 0.5]$ 。

对于 24 位彩色图像,我们将新的亮度矩阵与事先存储的色差矩阵合成生成 RGB 分量,如果此时 RGB 分量超过 $[0, 255]$ 的范围,我们将调整色差矩阵的数值,保证 RGB 分量不超过 $[0, 255]$ 的范围,然后按照读入图像的格式重新生成相同格式的图像,完成水印的嵌入过程。具体的增益控制流程如图 3 所示。

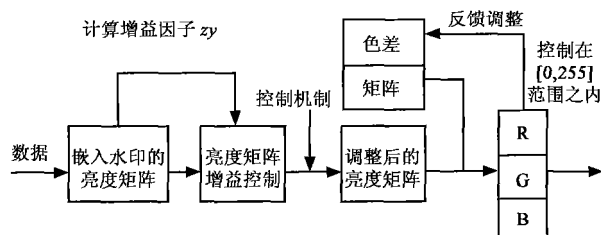


图 3 增益控制流程图

4 试验结果

我们选择 256×256 大小的彩色图像进行试验,在确

保 240 比特水印信息完全正确提取的情况下,分析该水印算法能够抵抗上述各种攻击的强度与图像保真度之间的关系,分析各种攻击对图像的影响以及水印检测的结果。为了判断频谱幅度关系调制算法的性能,我们将重点考虑基本旋转 (90° 、 180° 、 270°) 有限任意缩放对水印系统的影响,重点分析纠错编码之前的误码率。我们选择嵌入水印的频段为 0.2 到 0.4,所以缩放因子的理论区间是 $[0.4, 1]$ 。基于 FFT 变换感知模型中参数的确定通过试验确定了具体的数值。我们实际嵌入了 394 比特,其中前 16 位为水印的同步码,后 378 位为 $3/2$ 的卷积编码,有效信息位为 252 位,其中包括末尾的 7 位全 0 位。

水印的提取算法自动适应 90° 、 180° 、 270° 基本旋转后的图像,提取的水印信息没有任何误码存在。水印提取算法不需要预先知道缩放因子,实现了水印的盲提取,并且平均误码率为 0。



图 4 嵌入水印后图像的比较

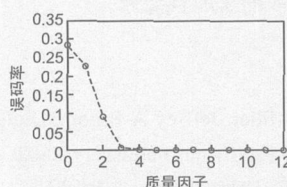


图 5 有损压缩后的水印提取平均误码率

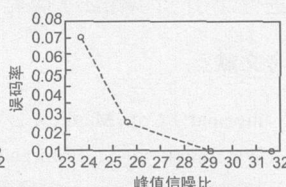


图 6 高斯模糊后的水印提取平均误码率

图 4 说明了算法的透明性是非常好的,平均信噪比和平均峰值信噪比达到了 30.978db 和 36.141db。按照 Photoshop 7.0 中 JPEG 压缩的质量因子的 12 层分级,从图 5 我们可以看出,在 Quality 4 的情况下,水印提取误码率仍

然为 0.0%。对图像进行高斯模糊,图 6 表示了高斯模糊参数从左至右依次为 1.5、1、0.5 以及一般模糊的情况下的误码率。图 7 显示算法对噪声攻击的鲁棒性。对 JPEG 质量因子 > 3 的情况下,对于 24 位真彩图像、8 位调色板图像以及 JPEG 图像之间的相互转换,试验结果证明格式转换对于水印的提取是没有影响的。

5 小结

对经历几何攻击的图像进行盲检测和水印信息提取,

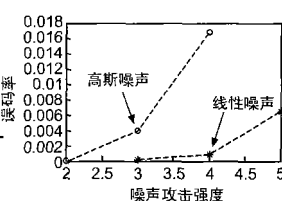


图 7 噪声攻击后的水印提取平均误码率

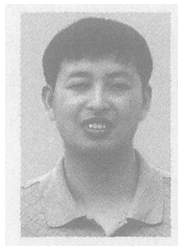
无疑是一项难度很高的挑战. 如果要提取的水印信息的容量还比较大, 在编码纠错之后水印信息的误码率要求为 0 或者很低, 盲检测的要求使得水印提取者不知道待检测的图像是否经过放缩和旋转, 这样的应用环境对算法设计者而言往往是困难的. 我们在手机彩信这种应用场景下, 充分利用了待检测水印的图像的尺寸, 来确定水印嵌入算法中水印坐标同步点, 而图像的完整, 保证了频谱的幅度波形不会发生变化. 该算法为完全解决盲检测的抗几何攻击图像水印算法提供了崭新的方法, 将在下一步的工作中继续完善.

本文提出的算法, 是针对在手机终端建立 WDRM (Watermark-based DRM) 的水印技术而设计的, 该算法试图在不同的手机终端建立统一的水印方案, 为彩信的发布方如运营商、ISP 或者 ICP 能够以统一的方式嵌入和检测水印, 提供标准的版权封装、检测、跟踪和仲裁业务, 盲检测和高容量的无误差提取可以使得 WDRM 结合 PKI 而引入密码机制, 为版权保护的商用奠定安全的基础. 该算法就是要解决彩信版权保护的实际需求, 从工程应用角度出发, 以高效、快速、安全、实用为算法特点. 试验以 256×256 像素的图像为例, 水印算法在图像的基本旋转、任意缩放、有损压缩、低通滤波、噪声攻击、格式转换等多种攻击情况下, 可以完全盲检测水印信息, 实际嵌入 394 比特, 水印的误码率控制在 10 比特 (2.54%) 以内. 由于在图像的 FFT 域进行计算, 可以保证水印提取的实时性要求.

参考文献:

- [1] Ingemar J Cox, Matthew L Miller, Jeffrey A Bloom. Digital Watermarking[M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [2] 胡云, 伍宏涛, 等. 大容量索引图像水印方案的设计与实现[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(1): 26 - 29.
Hu Yun, Wu Hong-Tao, et al Digital watermarking scheme in huge index image[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(1): 26 - 29. (in Chinese)
- [3] Lin C Y, Wu M, Bloom J A, et al Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 767 - 782.
- [4] O Ruanaidh J J K, Pun T. Rotation, scale and translation invariant digital image watermarking[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C]. Santa Barbara, Canada, 1997. 536 - 539.
- [5] O Ruanaidh J J K, Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking[J]. Signal Process, 1998, 66(3): 303 - 317.
- [6] 刘九芬, 王振武, 黄达人. 抗几何攻击的小波变换域图像水印算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(4): 386 - 392.
- [7] Liu Jiu-fen, Wang Zhen-wu, Huang Da-ren. Image watermark algorithm robust to geometric distortion in DW T domain[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2003, 37(4): 386 - 392. (in Chinese)
- [8] Pholsomboon S, Vongpradhip S. Rotation, scale, and translation resilient digital watermarking based on complex exponential function[A]. IEEE Region 10, Proceedings of TENCON 2004[C]. Chiang Mai, Thailand, 2004. 307 - 310.
- [9] Fung W, W L, Kunisa A. Rotation, scaling, and translation-invariant multi-bit watermarking based on log-polar mapping and discrete fourier transform[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo[C]. Amsterdam, Netherlands, 2005. 141 - 144.
- [10] Miller M L, Gwenaël J Dor, Cox I J. Applying informed coding and embedding to design a robust High-capacity watermark[J]. IEEE Trans on Image processing, 2004, 13(6): 792 - 807.
- [11] Pradhan S S, Ramchandran K. Distributed source coding: Symmetric rates and applications to sensor networks[A]. Proceedings of IEEE Data Compression Conf[C]. Snowbird, USA: IEEE Computer Society Press, 2000. 363 - 372.
- [12] A B Watson. DCT quantization matrices optimized for individual image[J]. SPIE: Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV, 1993, 1913(14): 202 - 216.

作者简介:



伍宏涛 男, 博士, 1973 年出生于湖南, 北京大学电子学系博士后, 主要研究方向为信息隐藏、数字水印、无线安全通信、卫星测控等。
Email: wht@pku.edu.cn

朱柏承 男, 博士, 1964 年生于黑龙江哈尔滨, 北京大学电子学系副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为软件无线电技术、通信电路设计和智能天线技术。

杨义先 男, 博士, 1961 年出生于四川省盐亭县, 北京邮电大学信息工程学院教授, 博士生导师, 信息安全中心主任, 在编码密码学、信息与网络安全、信号与信息处理等领域有深厚的造诣。