

一种基于人眼视觉特性和小波变换域的图像数字水印技术^{*}

傅德胜¹ 孙文静²

(南京信息工程大学 南京 210044)¹ (南京理工大学 南京 210094)²

摘要 提出了一种基于人眼视觉特性和小波变换的彩色图像数字水印算法,该算法采用 YIQ 色彩空间进行水印的嵌入,嵌入前先对水印进行三次随机置乱处理,然后利用视觉系统的掩蔽特性对 Y 分量的小波系数进行分类,计算 JND 阈值并对小波系数进行量化,然后将置乱后的三个水印序列以不同强度嵌入到不同方向的小波系数中。实验结果证明,该算法具有很好的不可见性,且对常见的攻击具有较好的鲁棒性。

关键词 数字水印嵌入,人眼视觉特性,变换域,置乱处理,JND 阈值

Image Digital Watermarking Technique Based on Human Visual System and Wavelet Transform Domain

FU De-sheng¹ SUN Wen-jing²

(Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)¹ (Nanjing Audit University, Nanjing 210029, China)²

Abstract A digital watermarking algorithm on color image based on human visual system and wavelet transform was proposed. This algorithm adopts YIQ color space to watermark embedding. The three-time random scrambling processing operations were made for the watermark before embedding. Then the wavelet coefficients of Y component were classified making use of the masking peculiarity of visual system. The calculation of JND values and the quantization of wavelet coefficients were made. Finally, the three scrambled watermarking sequences were embedded into wavelet coefficients of different directions by different intensities. Experimental results show that the proposed method not only has good imperceptibility but also has better performance in the aspect of robustness to common attacks.

Keywords Digital watermark embedding, Human visual system, Transform domain, Scrambling processing, JND threshold

早期的基于图像压缩编码的数字水印技术利用了调制变换函数(MTF, the Modulation Transfer Function)描述的频率敏感度。由 MTF 可以确定不同频带下人眼视觉系统可察觉到的最小变化,当图像在某一频带的频率成分变化小于该频带相应的 JND(Just Noticeable Difference)值时,人眼就察觉不到。若在 MTF 的基础上,再加入亮度敏感度将会使其更加精确,因为亮度敏感度充分利用了图像的局部亮度特征。

近年来人们开始研究基于视觉系统模型的水印算法,这些算法通常利用人眼视觉系统的掩蔽特征导出 JND 描述来确定各个部分所能嵌入水印信号的最大值,在 JND 阈值以内,可嵌入数据量大的水印信号以提高水印的鲁棒性,同时又保证了水印的不可见性。

目前比较典型的做法是折衷水印的不可见性和鲁棒性,平衡二者的矛盾。掩蔽函数法、块分类法和分频段嵌入法等自适应水印技术,其基本原理都是利用视觉门限或阈值,根据人类视觉和图像本身的不同特性,决定是否加入水印及加入水印的强度。

国内外学者提出了多种基于人眼视觉系统的水印算法,Christine I. Podilchuk 等在 DCT 域和小波变换域内进行水印嵌入和提取时,利用 JND 模型控制了嵌入水印信号的最大强度,最大可能地避免了对图像视觉质量的破坏,这一方法显示出了很好的透明性和鲁棒性。Seong-GeunKwon Seong-Won Ban 等人在文献[1]中首先对图像进行离散小波变换,然后将

小波域内连续子带量化和人类视觉系统有机地结合起来,将水印嵌入到基带中人类感觉重要的系数 PSCs(perceptually significant coefficients)上。江波、李峰则提出一种利用人眼视觉模型和小波变换进行彩色图像数字水印嵌入的方法^[2],通过将水印信息重复嵌入到宿主图像的中频和高频系数来增强鲁棒性。刘华建^[3]利用 ICPM(image complexity and perceptibility model)选择感兴趣区域,把水印信息通过改变某些区域系数的统计分布进行嵌入以获得更好的鲁棒性。Paris-sis^[4]等提出一种盲水印算法,水印信号从 YCbCr 彩色空间的亮度部分抽取而来,然后根据图像的比特值和三个向量修正每个位置的向量信息,将水印嵌入到三个彩色成分中。肖亮等^[5]采取直接序列扩展谱技术生成水印序列信号,然后通过确定的 JND 门限值决定水印强度和嵌入位置。

本文提出了一种基于人眼视觉特性和小波变换域的彩色图像数字水印算法。该算法采用 YIQ 色彩空间进行水印的嵌入,水印信息为有意义的二值水印图像。实验结果证明,该算法具有很好的不可见性,且对常见的攻击具有较好的鲁棒性。

1 视觉特性与水印容量的关系

在数字水印嵌入中,嵌入强度越大,载体图像失真的可能性越高,但鲁棒性就越强,水印信号就越不容易被破坏;嵌入强度越小,载体图像质量越好,但水印抗攻击能力就越弱。有

^{*}基金项目:江苏省产业技术研究与开发基金,苏发改高技发[2006]1106号。傅德胜 教授,博士生导师,研究方向为信息安全、模式识别;孙文静 博士生,研究方向为信息安全。

效的水印算法中必须保持不可感知性、鲁棒性和水印容量之间的平衡。此三者之间的关系可表示为：

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^k d(w_i) \leq D(X) \\ d(w_i) \leq d(j) \end{cases} \quad (1)$$

上式中, $D(X)$ 表示图像 X 所能容忍的最大失真, 对某一图像而言, 理论上是一个恒定值; $d(w_i)$ 为嵌入每个水印比特 w_i 时所引起的局部失真; k 为嵌入的比特数; $d(j)$ 为能容忍的局部失真最大值; $d(w_i) \leq d(j)$ 为局部约束, 其意义是保持水印的局部不可见性。

由(1)式可见, 水印嵌入要解决的是如何在满足全局保真度要求 $D(X)$ 和局部保真度要求 $d(j)$ 的前提下确定最佳嵌入强度。在水印算法中引入视觉模型, 最大程度地逼近 $D(X)$ 和 $d(j)$, 是解决该问题的有效途径, 可以在保证水印不可感知的条件下最大限度增强水印的鲁棒性。

同时可知, 在满足全局和局部约束的前提下, 增加鲁棒性就要增加 $d(w_i)$, 同时减少 k ; 相反减少 $d(w_i)$ 可使得 k 增加, 即增加水印容量。也就是说, 对某一嵌入区域, 若能容忍的噪声门限越大, 则能允许嵌入的水印比特数应该越多。

2 基于 HVS 和小波变换的彩色图像数字水印算法

基于人眼视觉特性和小波变换的彩色图像数字水印算法, 采用 YIQ 色彩空间进行水印的嵌入, 水印嵌入前先对水印进行三次随机置乱处理, 然后利用视觉系统的各种掩蔽特性对 Y 分量的小波系数进行分类, 计算 JND 阈值并对小波系数进行量化, 然后将置乱后的三个水印序列以不同强度嵌入到不同方向的小波系数中。

2.1 水印图像的预处理

直接利用水印算法将水印图像嵌入到原始图像会减弱水印的嵌入效果和安全性, 因此, 在嵌入水印图像前, 对水印图像进行置乱加密预处理具有重要作用。

数字图像置乱是通过对数字图像的位置或灰度级等作变换来“扰乱”图像, 以此达到在一定程度上迷惑第三者的目的。数字图像置乱一般可以在其位置空间、色彩空间或频率空间上进行, 通过将图像中像素的位置或者像素的颜色打乱, 使原始图像变换成一个杂乱无章的图像, 如果不知道使用的置乱变换算法, 很难恢复原始图像。图像置乱可以达到三个目的: 其一是加密, 即在不知道置乱的恢复方法时, 无法直接从置乱的图像中得到任何可见信息; 其二是图像经过置乱后是一个无法识别的杂乱信息, 无特征供统计分析, 再加载到另一幅图像时不会出现人眼容易识别的形状或颜色的交叠现象, 从而可以做到不可察觉; 其三在加载水印前对水印数据进行置乱, 将原始水印数据的信息分散到新水印数据的全局上, 从而可以确保图像部分受损的情况下, 仍可以部分甚至全部地恢复水印图像。

图像置乱技术主要有 Arnold 变换、幻方变换、Hillbert 变换等算法。本文先对 $N \times N$ 的图像 F 作取模形式的非线性变换,

$$P' = (A \times P) \bmod N \quad (2)$$

其中 $P = (x, y)^T$, $P' = (x', y')^T$ 分别为原图和变换后图像的像素位置, 变换矩阵 $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, 满足关系: $\{ad - bc \pm 1\} \mid a, b, c, d \in Z, Z$ 为整数集合, \bmod 为取模运算。此处 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$ 就是著名的 Arnold 变换。其数学表达式为:

$$P^n = (A^n \times P) \bmod N \quad (3)$$

其中 A^n 表示矩阵 A 的 n 次连乘, 而 P^n 则表示对 P 进行 n 次矩阵变换的结果。

也可以对色彩进行变换, 此时的 Arnold 变换如下:

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \pmod{256} \quad (4)$$

Arnold 变换具有周期性, 即随着迭代次数的增加, 图像逐渐趋于混乱, 但到一定次数时, 又将回到原图。

本文采用 Arnold 变换对原始二值水印图像进行 3 次随机置乱, 得到 3 个不同的水印随机序列 w_1, w_2, w_3 。

2.2 基于人眼视觉特性的小波系数分类

图像经过小波分解后得到的小波系数可用 $c_{l,\theta}(x, y)$ 表示, 其中 l 表示小波系数所在的级数, 取值为 $1, 2, \dots, N$, θ 表示方向, 取值为 LL, LH, HL, HH 。

频率视觉灵敏度描述了人眼对不同频率正弦波刺激的敏感程度。对于经过小波分解后的图像来说, 人眼对不同方向不同层次的子带图像的噪声敏感度不同, 例如对中高频率子图像的噪声较为不敏感, 特别对 45° 方向高频子图像中的噪声更不敏感。不同层 l 、不同子带 θ 的噪声掩蔽因子 $f_{l,\theta}$ 为

$$f_{l,\theta} = \begin{cases} 1.00HH, & \text{如果 } l=1 \\ \sqrt{2}, & \text{当 } \theta = \begin{cases} 0.32HH, & \text{如果 } l=2 \\ 0.16HH, & \text{如果 } l=3 \\ 0.10HH, & \text{如果 } l=4 \end{cases} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

人眼对不同背景亮度具有不同的噪声敏感性, 通常在中等亮度最为敏感, 向低亮度和高亮度两个方向呈非线性下降。Safraneck 通过实验测出了亮度噪声敏感度曲线。图像经过 N 级小波变化后, 得到低频分量 LL_N 和 $3 \times N$ 个高频分量。 LL_N 是原图像在分辨率 $1/2^N$ 上的逼近, 高频分量是细节信号。高频分量系数 $c_{l,\theta}(x, y)$ 的背景亮度可用低频分量上对应位置上的低频系数及其邻域的平均值来表示, 邻域的大小可取为 2×2 。设分解层次 l 中某空间位置 (x, y) 的亮度掩蔽因子为 $B(l, x, y)$

$$B(l, x, y) = 3 + \frac{1}{256} \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l I^{3:LL} \left(i+1 + \frac{x}{2^{3-l}}, j+1 + \frac{y}{2^{3-l}} \right) \quad (6)$$

根据 Safraneck 测出的不同亮度背景下的噪声敏感度, 本文将背景亮度噪声敏感性分为强、中、弱 3 类。

小波变换的低频分量是原图像的平滑成分, 高频部分表示图像的细节信息。因此低频分量的方差和高频分量值的大小, 可以体现出该区域的内容复杂度; 这两个值越大表示该区域的内容越复杂。当要度量系数 $c_{l,\theta}(x, y)$ 周围背景的复杂程度时, 用其对应位置的高一级低频系数 $c_{l+1,LL}(x/2, y/2)$ 相邻区域的 2×2 大小块的方差, 加上对应位置相同方向上高一级的高频系数 $c_{l+1,\theta}(x/2, y/2)$ 相邻 2×2 区域的平方和作为纹理能量函数 $q_{l,\theta}(x, y)$ 。

$$q_{l,\theta}(x, y) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (c_{l+1,\theta}(i + \frac{x}{2}, j + \frac{y}{2}))^2 + \delta(c_{l+1,LL}(\{1, 2\} + \frac{x}{2}, \{1, 2\} + \frac{y}{2})) \quad (7)$$

式中 $\delta(\cdot)$ 表示方差。根据此纹理能量函数将图像的复杂性分为复杂、一般和平滑三类。将纹理能量小于 500 的区域定义为平滑区, 大于 2000 的定义为复杂区, 介于两者之间的为一般区域。

人眼对图像边缘信息的亮度改变不敏感,因此在边缘附近加入水印信息人眼不易察觉。小波变换后的高频系数体现了边缘信息,所以本文在此基础上使用梯度算子进行边缘检测,以区分边缘区域和无边缘区域。

在载体图像某一小波系数上加入水印信息时要根据其所在区域的类别来确定加入的信息强度。类别的划分以上述的亮度掩蔽特性、纹理和边缘掩蔽特性为依据,其分类与编码如表 1 所示。

亮度掩蔽		纹理掩蔽		边缘掩蔽	
分类	编码	分类	编码	分类	编码
弱	11	复杂	11	有	1
中	10	一般	10	无	0
强	01	平滑	01		

由表 1 可以看出,以综合亮度、纹理、边缘特征对小波系数分类,每类用 5 位码字表示,记为 $T_{i,\theta}(x,y)$,则一共可分为 18 类($3 \times 3 \times 2$)。为了区分不同类别所能加入的信息强度,我们实际中可以根据分类结果在频率视觉阈值的基础上进行自适应调节。系数处于平滑、背景亮度接近 128 且无边缘的区域时,其分类编码为 01010,编码值最小,该类系数所能容忍的视觉失真最小,为基本频率视觉阈值,调节因子为 1;当系数处于复杂纹理且背景亮度很暗的区域时,其分类编码为 11111,编码值最大,该类系数所能容忍的视觉失真最大,其调节因子约为 1.5。结合实验,可以推出 JND 阈值 $j_{i,\theta}(x,y)$ 为:

$$j_{i,\theta}(x,y) = f_{i,\theta}(x,y) \times \lg T_{i,\theta}(x,y) \quad (8)$$

2.3 算法具体过程

水印的嵌入过程如图 1 所示。具体步骤为:

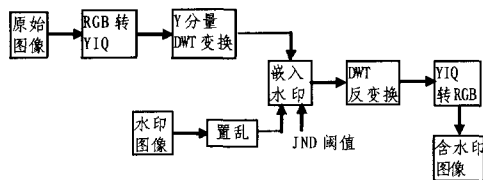


图 1 水印嵌入过程

(1) 水印信号为 w ,采用 Arnold 变换对其进行 3 次随机置乱,得到水印序列 w_1, w_2, w_3 。

(2) 原始 RGB 载体图像对应的 YIQ 空间为 $\{V(x,y)=[Y(x,y), I(x,y), Q(x,y)]; 1 \leq x,y \leq N\}$

提取出 Y 分量,对其进行 3 级小波分解,得到小波系数 C。

(3) 计算小波系数的 JND 阈值 $j_{i,\theta}(x,y)$ 。

(4) 将水印序列 w_1, w_2, w_3 分别嵌入到子带 LH_3, HL_3 和 HH_3 中。首先对 3 级小波系数用 $j_{i,\theta}(x,y)$ 进行量化,然后根据对应水印序列的值加入偏移量,如果水印信息为 1,则偏移量为 $j_{i,\theta}(x,y)$ 的一半,否则偏移量为 0。

$$c_{i,\theta}^*(x,y) = Q(c_{i,\theta}(x,y), j_{i,\theta}(x,y)) + \frac{1}{2} j_{i,\theta}(x,y) \times w_i(m,n) \quad (10)$$

其中, c^* 为嵌入后的小波系数, w_i 为水印序列, $Q(\cdot)$ 表示量化函数, θ 取 LH, HL, HH 时, i 分别为 1, 2, 3。

(5) 对嵌入水印后的 Y 分量的小波系数进行 DWT 逆变换。

(6) 将修改后的 Y 分量与原来的 I, Q 分量结合,将色彩空间从 YIQ 转换为 RGB,得到含水印的图像。

3 实验结果与分析

本文采用一组风景图像(图 2(a)-(d))进行实验,水印图像(图 3)为 64×64 大小的二值图像,进行小波域水印嵌入实验。

对小波域水印嵌入前后图像的特征值进行统计,结果如表 2、表 3 所示。表 3 中 $\Delta V, \Delta RGB, \Delta I, \Delta G, \Delta T$ 分别表示水印嵌入前后图像大小、RGB 值、亮度、灰度范围、熵的差值。从表 3 可以看出,水印嵌入前和嵌入后的图像的体积和颜色分量没有任何变化,图像的灰度分布范围也没有明显的变化,图像亮度相对误差位于 0.03%~0.49% 之间,所以该算法对图像的视觉效果没有明显的改变。熵值变化相对误差在 0.01%~0.08% 之间,平均相对误差为 0.05%。

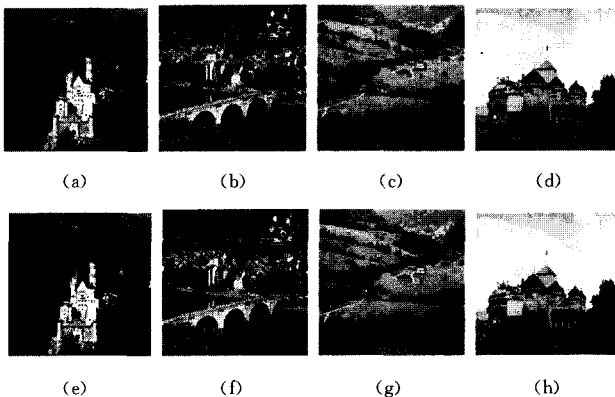


图 2 原始载体图像(a,b,c,d)与嵌入水印后的图像



图 3 原始水印图像

表 4 给出了在小波域水印嵌入后 4 幅图像(图 2(e)-(h))的 PSNR 值,为进行比较,同时给出了空间域水印嵌入的情况(图略)。从表 4 中可以看出, b 图的小波域算法的 PSNR 值较大,说明纹理比较复杂的图像用本文的小波域算法隐蔽性较好, d 图的空间域算法的 PSNR 值较小波域小 6.1268,差异较明显,因为 d 图的蓝色分量所占比重较大,而本文空间域算法是将水印信息嵌入到载体图像的蓝色分量中,所以隐蔽性差些。综合 4 幅图来看,小波域算法的隐蔽性要优于空间域算法。

表 2 小波域嵌入水印前后特征值

图像	属性					
	大小	RGB	亮度	灰度范围	熵	
嵌入前	a	768k	(89,123,111)	111.74	0-255	7.5643
	b	619k	(103,121,109)	114.48	7-255	7.5691
	c	300k	(108,139,99)	125.10	0-247	7.7442
	d	1268k	(167,180,185)	176.55	0-255	7.3245
嵌入后	a	768k	(89,123,111)	111.71	0-255	7.5651
	b	619k	(103,121,109)	115.05	6-255	7.5726
	c	300k	(108,139,99)	125.67	0-247	7.7396
	d	1268k	(167,180,185)	176.80	0-255	7.3307

表3 小波域水印嵌入前后图像特征变化量

图像	属性	$\Delta Y = Y_{前} - Y_{后}$				
		ΔV	ΔRGB	ΔI	ΔG	ΔT
a	0k	(0,0,0)	0.03	0-0	-0.0008	
b	0k	(0,0,0)	-0.57	1-0	-0.0035	
c	0k	(0,0,0)	-0.57	0-0	0.0046	
d	0k	(0,0,0)	-0.25	0-0	-0.0062	

表4 两种算法的 PSNR 值

属性	图像	a	b	c	d
		PSNR	小波域	34.7052	51.3835
	空间域	35.4039	35.7251	36.1554	31.2821

抗攻击实验是验证水印鲁棒性的有力手段,一个好的水印算法必须经过各种攻击测试才能对其作出客观的评价。攻击方法包括添加椒盐噪声、JPEG 压缩、剪切、中值滤波、锐化等。经过各种攻击后提取出的水印如图 4 所示。



图4 各种攻击后提取出的水印图

由图 4 可以看出,从总体上说,小波域算法的数字水印在上述 5 种攻击的情况下,提取出的水印大部分能够较清晰的辨认,但对剪切攻击和中值滤波的抗攻击性较差些,而对 JPEG 压缩和锐化的抗攻击性较好。

(上接第 62 页)

4.4 效率分析

陈泽文等方案的签名长度包括原 ACJT 方案的签名长度和为了成员撤销增加一个知识签名两个部分,原方案签名中增加了 8 次模乘运算,改进后的方案将两个知识签名减为一个知识签名,签名过程中签名者仅增加了 3 次模乘运算,签名长度也缩短了,对应的验证过程计算量也减少,同时本文改进后有效解决了 C. Popescu 提出的群盲签名可以链接的缺陷,使该群盲签名既具有成员可撤销性,又具有不可链接性。

结束语 文中基于 ACJT 群签名方案对陈的撤销方案进行了改进,结合 C. Popescu 提出的群盲签名思想,实现了更高效的成员可撤销的不可链接的群盲签名方案。该方案可应用于多银行电子现金系统中实现具有成员撤销功能的多银行电子现金系统,使电子现金系统更符合现实应用,更加接近现实中的金融系统。

参考文献

[1] Chaumd, Heyst F. Group signature // Advance in Cryptology-

结束语 基于人眼视觉系统(HVS)的图像数字水印技术已成为了当前数字水印领域研究的一个热点,该技术利用图像的局部特性,结合人眼视觉系统的特性来解决数字水印的鲁棒性和不可见性之间的矛盾,在保证嵌入的水印有足够强鲁棒性的前提下同时满足视觉不可感知性的要求。

本文提出了一种改进的基于人眼视觉特性和小波变换的彩色图像数字水印算法。该算法采用 YIQ 色彩空间进行水印的嵌入,水印信息为有意义的二值水印图像,为了提高安全性与抗干扰性,水印嵌入前采用 Arnold 变换对其进行三次随机置乱处理。在嵌入过程中,利用视觉系统的亮度掩蔽、纹理掩蔽、边缘掩蔽等特性将 Y 分量的小波系数进行分类,计算 JND 阈值并对小波系数进行量化,然后将置乱后的三个水印序列以不同强度嵌入到不同方向的小波系数中。本文对此算法在 Matlab 下进行实验,首先进行水印的嵌入,结果表明隐蔽性较好;采取一些攻击测试,包括噪声、剪切、滤波、JPEG 压缩等,实验结果证明,该算法具有很好的不可见性,且对常见的攻击具有较好的鲁棒性。

参考文献

[1] Kwon S G, Ban S W. Highly Reliable Digital Watermarking Using Successive Subband Quantization and Human Visual System. IEEE Tans. on Image Processing, 1999, 7(1):74-92

[2] 江波,李峰.一种基于离散小波变换和 HVS 的彩色图像数字水印算法微型机与应用,2004,3

[3] Liu Huajian, Kong Xiangwei, Kong Xiang dong, et al. Content based color image adaptive watermarking scheme. IEEE, 2001: 41-44

[4] Parisi A, Carre P, Fernandez- Maloigne C. Color image watermarking with adaptive strength of insertion. IEEE, 2004:85-88

[5] 肖亮,韦志辉,吴慧中.一种利用人眼视觉掩盖的小波域数字水印.通信学报,2002,3(23):100-106

[6] 李明,廖晓峰.结合混沌的小波变换数字水印技术.计算机科学,2007,34(8):245-247

Eurocrypt'91, LNCS. Berlin; Springer -verlag, 1992, 547: 257 - 265

[2] Camenisch J, Stadler M. Effient Group Signature Schemes for Large Groups [C]// Proceedings of CRYPTO 1997. Berlin: Springer-Verlag , 1997: 410-424

[3] Ateniese G, Camenisch J, Joye M , et al. A Practical and Provably Secure Coalition Resistant Group Signature Scheme [C]// Proceedings of CRYPTO 2000. Berlin: Springer-Verlag, 2000:255-270

[4] 陈泽文,王继林,黄继武,等. ACJT 群签名方案中成员撤销的高效实现. 软件学报,2005,1(1):151-157

[5] Lysyanskaya A, Ramzan Z. Group blind digital signatures : A scalable solution to electronic cash // Financial Cryptography (FC'98). Lecture Notes in Computer Science. Vol 1465, Springer-Verlag, 1998:184-197

[6] Popescu C . A Secure and Efficient Group Blind Signature Scheme[J]. Studies in Informaties and Control Journal, 2003 (12) :269-276