

# 小波域内图象零水印技术的研究

杨树国<sup>1),2)</sup> 李春霞<sup>2)</sup> 孙枫<sup>1)</sup> 孙尧<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001) <sup>2)</sup>(黑龙江八一农垦大学, 黑龙江密山 158308)

**摘要** 为了在保证图象质量的前提下实施图象的版权保护, 提出了一种图象零水印方法. 该方法改变了传统的向原始图象中嵌入水印信息来实现版权保护的做法, 采用从图象中抽取水印信息的方法来实现这一功能, 其核心思想是: 恰当选取图象小波变换的系数, 然后把它作为原始图象的基本信息进行定位和管理, 当对待认证图象进行认证时, 用同样的方法提取该认证图象的信息, 并对这些信息进行分析和检测, 从而判定该图象的版权和所有权. 通过实验证明, 这种方法具有无失真、鲁棒性好、简单易行及可操作性强等优点. 最后对该方法进行了推广, 使它不但可以从原图象中提取水印, 而且可以在图象外部加载水印, 该方法既能满足图象认证的需要, 又能用来进行数据隐藏.

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 水印 小波变换 Logistic映射

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)06-0664-06

## Study on the Method of Image Non-watermark in DWT Domain

YANG Shu-guo<sup>1),2)</sup>, LI Chun-xia<sup>2)</sup>, SUN Feng<sup>1)</sup>, SUN Yao<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Automation College of Harbin Engineering University, Harbin 150001)

<sup>2)</sup>(Heilongjian Eight-One Agriculture University, Heilongjiang Mishan 158308)

**Abstract** In order to protect the copyright of the image in the condition of the image quality, It brings forward a kind of the image non-watermarking method. It introduces the non-watermarking scheme, then it discusses the concrete process of this scheme at length. This method changes the traditional doings that the copyright of the image is protected by embedding the watermarking into the image to the method that the watermarking is drew out from the image. The central idea of this method is: the image wavelet coefficients are selected correctly firstly, then they are located and managed as the basic informations of the image. When the authentication image is to be identified, the same process is done to draw the informations out from the authentication image and those informations will be analyzed and detected to judged the copyright and the ownership of the image. It demonstrates this method is right by some tests. These tests prove that the method could make image distortion-free and be robust, simple, easy to use. Lastly, it makes the method broaden and watermarking can be drew out from the image and embedded outside the image. This method not only can satisfy the need of the image authentication, but also can be used to hide the data.

**Keywords** Computer image processing, Watermarking, Discret wavelet transform, Logistic mapping

## 0 引言

近年来,随着多媒体技术的不断发展和计算机网络的日益普及,数字媒体的应用取得了惊人的发展,多媒体信息的交流也达到了前所未有的深度和广度.人们可以通过Internet网发布自己的多媒体作品(包括音频、视频、动画、图象等)、传递重要信息、进行网络贸易等,但随之而来的副作用也十分明

显,例如任何人都可以通过网络轻而易举地得到他人的原始作品,尤其是数字化的图象、音乐、电影等,盗用者不但可以通过非法手段获取电子数据,而且还可以未经作者的同意而对原作品任意加以复制、修改、生产和再传输等,这些不法行为严重地侵害了作者的著作权,给版权所有带来巨大的经济损失,对信息安全造成强烈的冲击,因此如何在网络环境下对数字产品实施有效的版权保护已经成为了一个亟待解决的现实问题.

数字水印技术作为公认的能够有效地解决版权纠纷问题的技术,它刚一产生,就受到了国际科技界和企业界的高度重视,很快成为了当今信息科学中的一个新颖而具有广阔应用前景的研究热点。

从载体来看,数字水印有图象数字水印、音频数字水印、视频数字水印等几种类型,其中图象数字水印是数字水印中比较重要的和常用的数字水印,它是以数字图象为载体,利用某种图象处理方法将水印嵌入到图象中,从而实现对该图象的版权和所有权的保护功能,目前已成为广大科研人员研究的主要方向和重点。

在图象中嵌入数字水印的方法很多,从嵌入的位置上看,它主要可分为空域法和频域法两大类。目前在频域内嵌入水印已经被认为是比较安全和可靠的方法。在许多文献中采用的都是在 DCT、DFT 变换域上嵌入和提取水印的方案,由于现在图象的压缩标准是基于小波变换的,所以在小波变换域内嵌入和提取水印的方法已成为了图象水印技术发展的主要趋势<sup>[1]</sup>。

目前在几乎所有的文献中,不论在何种域上采用哪种方法嵌入水印,它们大都采用了在原图象上加载一定量的水印信息,然后提取该信息来进行判别的方式,这些做法都不可避免地存在着使图象失真、水印鲁棒性差、误检率高等缺陷,通过对几个公认为比较好的方法进行检测,结果发现,这些方法也不能避免且无法根除上述缺点。而基于小波变换的零水印的方法,不仅克服了上述缺陷,而且能够实现对该图象版权的认证功能,测试结果表明,该方法简单性、可靠性和可操作性都很好。

### 1 小波域内的零水印方案设计

基于小波变换的零水印方法也可称为小波系数检测法,其思想是:对原始图象进行  $L$  层的小波变换,把最低频子带区作为小波系数考察区,在此频域内利用两个密钥( $k_x, k_y$ )和混沌搜索算法确定频域系数考察点,然后利用中值法确定各考察点所对应的系数锁定区间,再利用混沌搜索算法搜索出这些区间端点所对应的密钥  $k_i$ ,以利于这些点的保存和管理,这就完成了小波域内系数检测法的第 1 个过程,如果把系数锁定区间的端点看成水印,此过程也可看成是水印的嵌入过程。当对一幅图象进行认证时,首先要对该图象进行同样尺度的小波变换,在低

频区根据密钥  $k_x, k_y$  和混沌搜索算法确定频域系数考察点,然后用密钥  $k_i$  和混沌搜索算法确定系数锁定区间,最后考察这些点的系数是否在其原来所应该在的对应区间内,系数在对应区间的考察点的个数(或匹配率  $T$ )就是判定图象版权的依据,其水印嵌入和检测流程如图 1、图 2 所示。

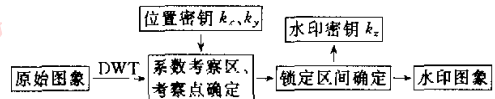


图 1 数字水印嵌入

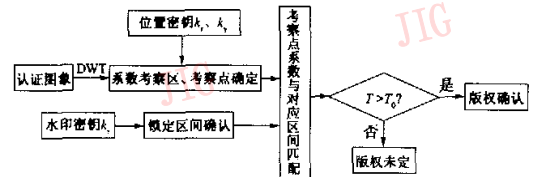


图 2 数字水印检测

#### 1.1 水印嵌入方法

##### 1.1.1 图象离散小波变换尺度的确定

小波变换是一种空域-频域分析方法,能够同时反映图象的空间位置和频率,具有多分辨率分析的特点,而且在时频两域都有表征信号局部特征的能力,即在低频部分有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。选择小波变换域的低频区作为系数考察区,也是考虑到了此区内系数具有抗干扰能力强的特点<sup>[2]</sup>。确定对图象进行小波变换的层数,其主要依据是图象的大小,一般来讲,图象的尺度(长和宽)比较大,对其进行小波变换的层数也应该比较大,反之,若图象的尺度(长和宽)比较小,对其进行小波变换的层数也应该比较小,实践中比较合理的确定方式是  $L = \text{Int}(\min(M, N)/2^5)$ ,例如,对于  $256 \times 256$  大小的图象,一般进行  $L=3$  层的小波变换,对于  $128 \times 128$  大小的图象,一般进行  $L=2$  层的小波变换。

##### 1.1.2 小波域系数考察点的确定

小波域系数考察点的确定包括两个过程:一是系数考察点个数的确定;二是系数考察点位置的确定。前者是由分解后最低层的大小来确定的,实际上在分解层数确定后,其范围基本上就确定了,如  $256 \times 256$  大小的图象进行  $L=3$  层的小波变换后,低频子带区的大小为  $32 \times 32$ ,那么它就可以作为系数的考察区,在此

区内,可以选取的考察点的个数  $N$  将小于  $32 \times 32$ .

设定密钥  $k_1, k_2$  (如 0.01 和 0.02), 采用两个 Logistic 映射

$$x_{i+1} = 4x_i(1-x_i) \quad (0 < x_i \leq 1) \quad (1)$$

$$y_{i+1} = 4y_i(1-y_i) \quad (0 < y_i \leq 1) \quad (2)$$

作为考察点行地址的产生器和列地址的产生器, 这里  $x_0 = k_1, y_0 = k_2$ , 取  $X_i = \text{Int}(32x_i), Y_i = \text{Int}(32y_i) (i=1, 2, \dots, 200)$  作为考察点的行坐标和列坐标, 这样就得到了 200 个考察点的位置坐标  $(X_i, Y_i)^{[3]}$ .

### 1.1.3 小波域内水印的确定和管理

得到了考察点后, 将这些考察点按其所对应的小波系数 (记为  $f_L(X_i, Y_i) (i=1, 2, \dots, N)$ ) 以从小到大的顺序进行排列, 得到小波系数集合  $\{f_L(1), f_L(2), \dots, f_L(N)\}$ , 对这些系数按中值法进行限制区间的锁定:

$$f_L(j) \rightarrow (Q_{j-1}, Q_j) \quad (j=1, 2, \dots, N)$$

其中,  $Q_0 = (3f_L(0) - f_L(1))/2, Q_j = (f_L(j+1) + f_L(j))/2 (j=1, 2, \dots, N-1), Q_N = (3f_L(N) - f_L(N-1))/2$ .

这个映射将考察点的小波系数变化范围限制在锁定区间内, 这是对图象低频子带系数最大范围的锁定, 依据的原理是: 图象小波变换的低频子带内的系数稳定性最好, 在保证图象质量的前提下, 对其采用一般的信息处理方式对这些系数改变的幅度是很小的. 这里可以把这些锁定区间端点  $Q_j (j=0, 1, \dots, N)$  看成是水印, 但实际上并没有将其嵌入到图象中, 而只是在检测图象时将其作为原位置提取出来的小波系数的参考点而已, 所以经过上述处理后, 并没有向图象中加入任何信息, 因此不会造成图象失真, 得到的这些锁定区间是用来对待测图象中相应子带中的频域系数进行判定的依据.

显然, 这些提取出来的水印 (端点) 很重要, 但这些水印的存储和记忆是个问题, 下面利用混沌映射法来对这些水印进行管理, 该法的思想是: 把这些水印点看成是混沌序列点, 然后利用混沌搜索法来确定产生该序列的初值, 并把它当成密钥, 那么只要把此密钥保存好, 待到要恢复此序列时, 用此密钥输入原混沌映射即可生成该序列.

首先, 可把这些水印值映射到区间  $[-1, 1]$  上, 但必须要利用一一映射来进行, 一般情况下采用线性映射

$$Q_j \mapsto aQ_j + b (j=0, 1, \dots, N) \quad (3)$$

其中,  $a = 2/(Q_N - Q_0), b = -1 - aQ_0$ .

其次, 可用混沌搜索法来进行密钥  $k_2$  的搜索, 同样可利用 Logistic 映射, 初值设为  $x_0$

$$x_{j+1} = 1 - \mu x_j^2 (0 < \mu \leq 2, -1 \leq x_j \leq 1)$$

限定条件为

$$\text{fabs}(x_{j-1} - Q_{j+1}) < 10^{-t} (j=0, 1, \dots, N-1, t \in \mathbb{Z}^+)$$

一般情况下, 可取  $t \geq 5$ , 可能在一次搜索过程中不能搜索到这样的  $x_t$ , 这时可以调整初值  $x_0$ , 然后再进行搜索, 如此进行下去, 当将这些  $x_t$  全搜索到时, 对应的初值  $x_0$  即为要找的密钥  $k_2$ , 此时只需记住它和  $Q_0$ , 将来进行图象检测时所需要的水印或锁定区间的端点就可以得到了.

在实践操作中发现, 当嵌入水印量很大, 例如  $N=100$  时, 密钥  $k_2$  的搜索就很困难, 此时可以将水印分成小组进行搜索, 例如可设 20 个为一组, 分成 5 组, 对每一个组进行密钥搜索, 从而得到密钥  $k_z^{(1)}, k_z^{(2)}, k_z^{(3)}, k_z^{(4)}, k_z^{(5)}$ , 由它们组成向量密钥  $k_z = (k_z^{(1)}, k_z^{(2)}, k_z^{(3)}, k_z^{(4)}, k_z^{(5)})$ , 这样可以简化搜索的过程, 使用起来也很方便.

### 1.2 水印检测算法

水印检测步骤如下:

(1) 对待测图象进行  $L$  级小波变换, 得最低子带系数 (系数考察区).

(2) 利用位置密钥  $k_1, k_2$  和混沌搜索法找到当初考察点的位置, 并得出该位置对应的小波系数  $f_L(X_i, Y_i)$ .

(3) 把向量密钥  $k_z$  作为初值, 利用混沌搜索法 ( $x_{j+1} = 1 - \mu x_j^2 (0 < \mu \leq 2, -1 \leq x_j \leq 1)$ ) 来找到锁定区间的端点  $Q_i (\approx x_j)$ .

(4) 判断  $f_L(X_i, Y_i)$  是否在  $[Q_{i-1}, Q_i] (i=1, 2, \dots, N)$  内, 并统计落在对应区间内的小波系数  $f_L(X_i, Y_i)$  的个数  $S$  和匹配率  $T = S/100$ .

(5) 如果  $T$  大于事先给定的阈值  $T_0$ , 则认为该图象存在原始水印, 图象的版权应该属于作者, 否则认为该图象不具有原始水印, 图象的版权与作者无关.

## 2 阈值 $T_0$ 的取值分析

阈值  $T_0$  是从待测图象中提取出来的小波系数与原图象匹配区间的匹配率的限度, 它与图象的特性紧密相关.

取 50 幅图象作为原图, 对图象匹配率作了两种试验: 一是图象自身匹配率的测定, 对各图象分别进

行确定考察点和匹配区间的操作,然后对每幅图象进行剪切、替换、压缩、旋转等操作,最后检测其匹配率,结果发现,在保证原图象质量的前提下,其匹配率是很高的,几乎都在 0.5 以上,这和小波域低频子带系数的稳定性是分不开的;二是图象间交互匹配率的测定,在不同图象之间进行交互匹配测定时(如利用 a 图的检测点和 b 图的指定区间进行匹配),发现匹配率非常低,几乎都低于 0.1,这是因为不同图象之间小波系数的幅值和范围差异很大,这也说明了该方法的误检率非常低。

基于上述试验和分析,对于每幅图象来说,其检测阈值  $T_0$  可以选用比较小的值,具体值可以通过多次试验来确定,在兼顾所有可能的攻击和原图象质量能够得到保证的情况下,试验匹配率的最低下限即可选为阈值  $T_0$ 。这样对图象攻击造成的匹配率低于阈值时,由于图象已经受到了极大的破坏,因此对其攻击就失去了意义,否则可以对图象主张版权。

### 3 试验分析

使用图 3 中的  $128 \times 128 \times 8$  标准测试图象来进行测试,对其进行  $L=2$  级的小波变换,利用上述水印的嵌入方法得到含水印的图象图 4(因为没有嵌入任何数据,图 4 和图 3 没有任何区别),取阈值  $T_0=0.5$ 。



图 3 标准原始图象      图 4 含水印的图象

#### 试验 1 剪切、剪切并替换

首先对上述含水印的图象从左上角开始进行不同比例的剪切操作,得到要验证的图象,然后按照上述方法对其进行检测,得到如表 1 的结果(剪切区域为正方形,剪切比例=剪切区域的宽度/水印图象的宽度)。

表 1 对水印图象进行不同比例剪切的检测结果

剪切比例 (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
匹配率 $T$	0.95	0.90	0.83	0.82	0.76	0.72	0.58	0.46	0.33

从表 1 可以看出,当剪切比例小于 75% 时,在低频域内计算出的匹配率都大于 0.5,这说明图象中频域系数被改变的考察点个数很少,可以认为图象中的水印没有被破坏,认证图象的所有权属于原作者<sup>[4]</sup>。

同样对其进行剪切-替换操作,结论基本上一致。

#### 试验 2 JPEG 有损压缩

对含水印的图象(图 4)进行 JPEG 有损压缩,然后对其进行检测,检测结果如表 2 所示。

表 2 对含水印的图象进行 JPEG 有损压缩后的检测结果

QF	匹配率
90	0.78
70	0.65
50	0.57
30	0.32
20	0.12

JPEG 压缩的效果用质量因子 QF (Quality Factor) 来表示, QF 越大,压缩质量越好,压缩比就越小。JPEG 压缩破坏了高频部分的系数,随着质量因子的减小,图象压缩比增大,被破坏的低频系数越多,但此时图象的失真也很大,基本上丧失了图象的本来面目。

#### 试验 3 中值滤波和加噪

对含水印的图象(图 4)进行中值滤波,并且添加了高斯噪声,然后进行检测,检测结果如表 3 所示。

表 3 对含水印的图象进行中值滤波后的检测结果

中值滤波器	匹配率
$3 \times 1$	0.82
$1 \times 3$	0.78
$5 \times 1$	0.60
$1 \times 5$	0.61

上述检测结果也表现出该水印对中值滤波和噪声具有较好的鲁棒性。

#### 试验 4 旋转

旋转和平移等几何变换是对水印最为严重的攻击方式,曾对一些比较好的方法进行了几何攻击测试,但它们表现出来的鲁棒性都不是很强。

以水印图象的中心为圆心对其进行旋转,旋转角度为  $\alpha$ , 同时进行剪裁,以保持图象为矩形(最大限度地保留图象的中央部分),为了提取水印,将旋转后的图象再反向旋转,以恢复原方向,图象被裁去部分用无水印的原图象填充,对不同的旋转角度  $\alpha$ , 检测结果如表 4 所示。

表4 对含水印的图象进行旋转后的检测结果

旋转角 $\alpha(^{\circ})$	匹配率
1.0	1.00
2.5	0.92
3.0	0.81
5.0	0.64
10.0	0.45
15.0	0.36

从上面的检测结果可以看出,该水印方案还是有一定的鲁棒性.此外,还利用 Photoshop 软件对含水印的图象(图4)进行了局部模糊化和尖锐化等操作,并对试验结果也进行了分析,从结果上看,该水印技术对认证图象进行的评估结果也很合理,符合实际情况.

## 4 本方法的推广

利用小波域系数检测法对图象实施版权保护,试验证明该方法是可行的,这种方法的核心是从原始图象中提取并保管水印,用以满足版权认证的需要.当然该方法还可以更进一步,比如还想在原图象中体现出一些有意义的数据,如一段说明性的文字、一个图象、一个徽章或印章等,这时可以把它们与提取出来的水印相结合.为了说明上的方便,这里把从原始图象中提取出来的水印(考察点的系数)称为原始水印,把要加入的图象或文字数据称为加载水印.

### 4.1 加载水印与原始水印的结合

首先,可把有意义的数据,如文字、印章等编码成一个二进制的水印序列,若是文字可采用其QB码或ASCII码,如果是印章等图象数据可利用其灰度进行编码等,这样就可以得到一个长度为 $N$ 的二进制序列 $\{S_j\}(j=0,1,2,3,\dots,N-1)$ .

然后,可由小波系数检测法提取出长度为 $N$ 的水印序列,设从原始图象中提取出来的水印信号序列为 $\{Q_j\}(j=0,1,2,3,\dots,N-1)$ ,保存密钥为 $k_e$ ,则用如下的对应关系,可生成二值水印序列 $\{W_j\}(j=0,1,2,3,\dots,N-1)$ 为

$$W_j = \begin{cases} 0 & -1 \leq Q_j < 0 \\ 1 & 0 \leq Q_j \leq 1 \end{cases}$$

这样 $\{Q_j\}$ 与 $\{W_j\}$ 就建立了一一对应关系.

最后,将 $S_j$ 和 $W_j$ 进行异或,生成一个新的二值序列 $\{U_j\}$ ,这样就相当于将图象或文字数据等加载水印与提取出来的原始水印进行了外部结合,实际

上也就相当于将这些数据嵌入到了原始图象中.

为了对新生成的序列 $\{U_j\}$ 进行妥善管理,同样可利用混沌搜索法搜索出此序列的生成密钥 $k'_e$ ,对于密钥 $k_e$ 和 $k'_e$ 要妥善保管.

### 4.2 加载水印的检测

进行加载水印的检测时,可采用如下步骤:

(1)用1.2节的方法从待检测图象中找到当初嵌入水印的位置,并得出该位置对应的小波系数 $f'_L(X_i, Y_i)$ .

(2)把向量密钥 $k_e$ 作为初值,利用混沌搜索法 $(x_{j+1} = 1 - \mu x_j^2 (- < \mu \leq 2, -1 \leq x_j \leq 1))$ 来找到锁定区间的端点 $Q_i (\approx x_i)$ .

(3)判断 $f'_L(X_i, Y_i)$ 是否在 $[Q_{i-1}, Q_i](i=1, 2, \dots, N)$ 内,如落在该区间内,则 $W_{i-1}$ 不变,否则将 $W_{i-1}$ 取反,这样就得到一个反映匹配情况的二进制序列 $\{P_j\}(j=0, 1, 2, 3, \dots, N-1)$ .

(4)用 $k'_e$ 生成序列 $\{U_j\}$ ,然后将其与 $\{P_j\}$ 进行异或,即可生成一个二进制序列,将此序列进行解码即可恢复加载的文字或印章等.

用上述步骤和第3节的试验方式对加载的图象和文字进行了试验,试验效果也很好,这也说明了该方法是可行的,其不但可以从原图中提取水印,而且可以加载其他水印,不但可以满足图象认证的需要,而且可以用来进行数据隐藏.

## 5 结语

大家知道,向图象中嵌入和提取(检测)水印的主要目的有两个:一是版权(所有权)认证;二是图象完整性保护,前者是鲁棒图象数字水印的主要工作,后者是易损图象数字水印的主要目的,究其根本无非是为了对图象实施更好的保护,既然是这样,那么嵌入水印的方法(称之为嵌入式水印算法)就背离了初衷.嵌入式水印算法的两大弊端:一是对图象造成破坏,因为即使再优秀的嵌入式水印算法,也是向图象嵌入了数据(水印),这就不可避免地对图象造成了一定程度的破坏;二是隐蔽性和稳定性不易兼得,为了增强不可见性,嵌入的水印量要小,但为了增强水印的稳定性,嵌入的水印又不能过少,因此水印量的平衡是一个非常难于处理的问题.于是本文从相反的角度出发来探索这个问题,既然嵌入式水印会对图象造成破坏,那么为什么不用提取式水印算法呢?即从图象中提取出某些特征,把它作为水印,而

这种水印与原始图象的主要特征紧密结合,在图象的质量能够保证的情况下,这种水印的稳定性和安全性都能得到充分的保证,又不损害原始图象.

正是基于上述思想,提出了一种新的基于小波变换的零水印方法,这里也称之为小波系数检测法,对比以前的水印算法,该方法具有以下几个明显的优点:

(1)把考察点的小波系数的锁定区间端点看成是水印,并没有向这些系数中加入真正的水印,因此该方法可以说是零水印的.

(2)采用了小波变换,但此变换只是用来从原始图象或认证图象中提取低频子带考察点的系数,并不需要进行真正执行逆小波变换,从而也避免了数值误差,所以利用该方法得到的水印图象是无失真的.

(3)在考察点位置的确定、锁定区间端点的管理上采用了混沌搜索算法,保证了考察点位置的随机性,从而提高了水印的鲁棒性和方法的可靠性、安全性.

(4)把该方法进行了推广,将提取水印与加载水印进行了有机结合,既能提取水印又能加载水印,不但满足了图象版权认证的需要,而且能够实现数据隐藏,使该方法的应用范围更加广泛.

该方法突破了“向原始图象中嵌入水印”的常规解决方案,与当前流行方法的思想截然相反,从另一个角度来研究了图象版权的问题,当然这种思想和方法还有待进一步的研究和论证,使之得到更好的完善,使之可行性和实用性更强.

#### 参考文献

- 1 钮心忻,杨义先.基于小波变换的水印隐藏与检测算法[J].计算机学报,2000,23(1):21~27.

- 2 何军辉,蔡汉添.频域图象数字水印技术[J].通信保密,1999,(4):70~74.
- 3 凌聪,孙松庚.一种混沌扩频码序列设计的准则[J].电子科学学报,1998,20(4):558~561.
- 4 Walton S. Information authentication for a slippery new age[J]. Dr. Dobbs Journal, 1995,20(4):18~26.



**杨树国** 1970年生,工学硕士,黑龙江八一农垦大学副教授,现为哈尔滨工程大学自动化学院在职博士研究生.主要从事计算机理论、网络安全技术、数字水印技术及数字信号处理等方面的研究.



**李春艳** 1967年生,黑龙江八一农垦大学副教授,现为哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院硕士生.主要从事计算机安全、网络安全技术及数字信号处理等方面的研究.

**孙枫** 1944年生,工学学士,哈尔滨工程大学自动化学院教授,博士生导师.主要从事导航制导技术、信息处理技术等方面的研究.

**孙亮** 1963年生,工学博士,哈尔滨工程大学自动化学院教授,博士生导师.主要从事导航制导技术、数据融合技术、信息安全理论等方面的研究.