

基于 CDMA 扩频技术的图象水印算法

方艳梅 黄继武

(中山大学信息科技学院, 广州 510275)

摘要 为了增强水印的稳健性和提高运算速度, 提出了一种应用直接序列扩频的码分多址通信技术(DS-CDMA)的图象离散小波变换域水印算法. 该算法先采用 m 序列优选对来生成正交的 Gold 序列集, 然后将改进后的 Gold 序列对水印信息进行扩频, 并形成互相叠加的 CDMA 编码, 最后将其嵌入到原始图象的 DWT 变换域. 在水印提取时, 则利用正交码的自相关函数特性来检测出扩频到 Gold 码的水印信息, 从而实现了隐藏信息的盲检测. 与已报道的同类算法的性能比较表明, 应用该算法隐藏的水印信息量较大, 且水印稳健性好.

关键词 数据安全与计算机安全(520·1060) 图象水印 码分多址通信 Gold 序列 离散小波变换

中图分类号: TP309.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)11-1314-06

Image Watermarking Algorithm Applying CDMA

FANG Yan-mei, HUANG Ji-wu

(School of Information Science and Technology, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Abstract Theory and method in digital communication have been applied effectively to the embedding and detection of digital watermark. The method is efficient to embed the watermark bits into the digital media by the principle of CDMA communication due to its many advantage, such as, multiple-accessing, excellent secrecy, standing firmly against disturbing, and resisting noise attacks etc. In this paper, a DWT-based image watermarking algorithm applying DS-CDMA is proposed. The orthogonal Gold sequences sets generated via the preferred-pair of m sequences are well improved, and then are used to spread spectrum of the watermark. The CDMA encoded watermark is embedded into the DWT domain by modulating selected DWT coefficients of the image in a fashion similar to CDMA. Blind recovery of the embedded data is achieved by analyzing the DWT coefficients of the watermarked image and the auto-correlation of orthogonal codes. The proposed algorithm is compared with the existing watermarking schemes based on CDMA. The experiment results demonstrate that the watermark with the proposed algorithm is robust to JPEG compression, Gaussian noise and other typical attacks. The hidden information is secure well and hard to resist by unauthorized detection and attacks because of the same private key.

Keywords Image watermarking, Code Division Multiple Access (CDMA), Gold sequences, Discrete Wavelet Transform(DWT)

0 引言

随着计算机宽带数据网络的快速发展及数字化消费产品的广泛应用, 人们已可以轻易地访问各种数字媒体(声音、图象、视频等)并进行处理, 由于这

种信息的公开传输, 致使其遭受破坏、盗窃的事时有发生, 因此, 媒体安全及版权保护已经成为当务之急. 数字水印技术就是一种通过在数字媒体中嵌入版权保护信息, 以防止对图象进行篡改和未经授权的拷贝和分发的技术^[1,2]. 其近年来已成为信息安全领域中不少研究学者关注的焦点.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60133020); 国家自然科学基金(69975011, 60172067); 国家 863 计划(2002AA144060);

教育部跨世纪优秀人才基金教育部博士点基金(20020558038); 广东省自然科学基金重点项目(013164)

收稿日期: 2002-06-26; **改回日期**: 2003-06-23

数字通信的理论和方法可有效地应用于数字水印的嵌入和检测过程^[5]。大家知道,在无线通信系统中,采用直接序列扩频的码分多址通信 DS-CDMA (Direct Sequence-Code Division Multiple Access) 方法可以使用户数目超过通信系统的容量^[4]。由于 CDMA 系统有诸多优点,如可多址复用、容量大、保密性好、抗干扰力强、抗噪声等等,尤其是在基带信号的可选信道中,访问个人信息,并且,由于第 3 方无法重组基带信号,从而可以防止个人攻击,因此利用 CDMA 通信原理在数字媒体中嵌入数字水印信息是一种保护信息安全行之有效的办法。

Joseph 等于 1998 年提出采用 DS-CDMA 形式首先将水印信息以字符序列的形式扩频到 m 序列上^[5],再进行 CDMA 扩频编码,然后对原始图象进行 128×128 分块 DCT,再将编码以后的水印信息嵌入到离散余弦变换 DCT (Discrete Cosine Transform) 系数上,但 m 序列并不是最理想的,因为其可用的地址码组数少。作者只在 DCT 域上嵌入了 19 个字符,容量就受到限制;Silvestre 等提出了一种首先将原始图象进行离散傅立叶变换 DFT (Discrete Fourier Transform),同时选择 DFT 系数组成若干个独立的频带;然后利用原始密钥生成两个正交码集来对水印信息进行 CDMA 扩频编码,再分别调制到 DFT 以后的幅度和相角的技术^[6],但由于 DFT 与国际标准不兼容,因此 DFT 算法难以成为主流;Kohda 等提出使用扩频技术,并通过 CDMA 通道在彩色图象中嵌入数字水印的技术^[7],该技术首先将 RGB 图象转换成 YIQ 信号,再通过选择 Y 分量的前 15 个 DCT 系数、I 分量的前 6 个 DCT 系数、Q 分量的前 3 个 DCT 系数来组成独立的 CDMA 信道,以嵌入水印信息;Vassaux 等提出直接在空间域将原始图象分成多层位面来作为独立的 CDMA 信道,并选择其中的 1、2、4、8 层嵌入水印信息的技术^[8]。但由于在空间域嵌入水印,色度 (Hue)、亮度 (Brightness)、饱和度 (Saturation) 的某些特性(如频率特性)不能更方便地结合到水印编码过程中,因此水印的信息容量和稳健性能受到一定限制。文献[9]~文献[11]指出,由于视频是时空函数,因此 CDMA 形式的扩频通信在未经压缩的数字视频水印中具有更加合理的应用,特别是,由于 CDMA 模式具有多用户共享的特征,因此是一种特别适用于大型多媒体数据库中的基于目标的数字水印技术。

本文提出一种采用 CDMA 技术在图象 DWT 域中加入水印信息的新颖方法。该技术首先将原始图象进行更符合人眼视觉特性的 DWT,同时选择合适的小波系数作为载波信道;然后采用 m 序列优选对来生成 Gold 码的正交序列集,同时用改进后的 Gold 序列对水印信息进行扩频来形成互相叠加的 CDMA 编码,并进行调制;最后利用正交码的自相关函数特性来检测出水印信息。该算法具有如下几个特点:(1) 由于采用了 CDMA 扩频编码,故水印的稳健性能好;(2) 由于采用了 CDMA 码分多址复用技术,故嵌入的信息量较大;(3) 实现了信息隐藏的盲检测;(4) 采用 DWT 和改进的 Gold 序列,可使算法实现简单,计算量小;(5) 隐藏信息的保密性好,不容易被截获。

1 水印嵌入模型

采用 CDMA 技术的水印嵌入及检测过程如图 1 和图 2 所示,其中主要有 Gold 码的生成与改进、CDMA 编码、水印嵌入和水印检测等几部分,下面分别讨论各阶段的实现算法。

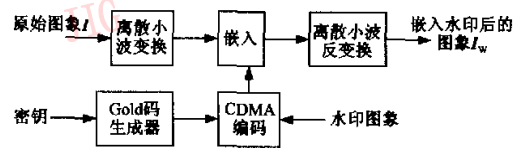


图 1 水印嵌入过程

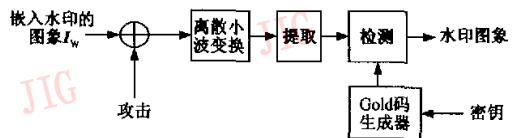


图 2 水印检测过程

1.1 Gold 码的生成

由于具有良好伪随机特性和相关特性的 CDMA 编码对于扩频通信系统的性能是非常重要的,因此在 CDMA 通信系统中,扩频编码应具有如下理想特性^[4]:(1) 有尖锐的自相关特性;(2) 有处处为零的互相关值;(3) 不同码元数平衡相等;(4) 有足够多的编码;(5) 编码有尽可能大的复杂度。

大家知道, m 序列具有双值自相关特性,其自相关函数为

$$\rho(\tau) = \begin{cases} 1 & (\tau = 0) \\ -1/N & (\tau \neq 0) \end{cases} \quad (1)$$

m 序列虽有优良的自相关特性,但也有如下不足之处:如由 m 序列组成的两两互相关特性为优选对的序列集很小,则可用的地址码数少。

而准正交的 Gold 序列较 m 序列有更好的互相关特性和近似相同的自相关性能,且有大得多的独立码组数,因此可通过对 m 序列优选对进行移位相加,即

$$G(a, b) = (b+a, b+Ta, b+T^2a, \dots, b+T^{n-1}a, b, a) \quad (2)$$

来构成新的 2^n+1 个码序列,即 Gold 序列集,由于它们的互相关旁瓣都很小,且自相关函数和互相关函数均有界,因此文献[12,13]选择了用 $n=9$ 的 m 序列特征多项式优选对(9,4)和(9,6,5,4,2)来生成 512 个长度为 $N=2^9-1=511$ 的 Gold 序列集。

1.2 改进的 Gold 码集

由于所生成的 Gold 码是平衡序列,即在一个序列周期中,“1”的个数比“0”多 1,因此在平衡 Gold 码末尾加一位“0”,可使每个 Gold 码的“1”跟“0”的个数相等后,其自相关峰值将变大,且其中最大互相关绝对值有一部分下降,说明加“0”可以改善平衡 Gold 码的性能。此时若可形成改善 Gold 码集的 $(N+1) \times (N+1)$ 矩阵 G , 则

$$G^T G = \begin{bmatrix} N+1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & N+1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & N+1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2^n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2^n & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

可见,其正交性或互相关函数特性可得到明显改善。

1.3 CDMA 编码

CDMA 是直接序列扩频技术的应用,其目的是将多个用户的信号合并,并保持一定的独立性,因此其原理应用于数字水印技术应具有显而易见的优越性。本文在考虑盲检测的情况下,用 CDMA 技术嵌入水印,即在一幅 512×512 的 Lena 灰度图象中嵌入 20 个字符“ZhongShan University”,而在一幅 512×512 的 Baboon 灰度图象中嵌入一幅 32×32 的二值图象。两种情况的信息编码方法和检测算法基本相同,其水印信息的 CDMA 扩频编码方法如下:

首先将要嵌入的水印信息表示为二进制的形式 $\hat{b} = (\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_M)$, $\hat{b}_i \in \{0, 1\}$, M 表示水印信息的位数;然后将二进制水印信息 \hat{b} 通过映射转换成矢量

$b = (b_1, b_2, \dots, b_M)$, $b_i \in \{1, -1\}$, 其中映射 $1 \rightarrow -1$ 和 $0 \rightarrow 1$ 极其重要,由于它可以替代有限域代数的异或操作^[14],因此在数字水印的检测过程中非常有用。对 Gold 序列进行同样的映射, $g_1(1), g_2(2), \dots, g_n(k)$ 为已生成的 Gold 正交序列集 (512×512), 其中, $g_n(k) = \{+1, -1\} | 1 \leq n \leq 512, 1 \leq k \leq 512$, 代表第 n 个 Gold 序列的第 k 位,于是即可得到如下向量

$$C = \{c_k\} = \left\{ \sum_n b_n g_n(k) \right\} k = 1, 2, \dots, 512 \quad (4)$$

式中, $g_n(k)$ 为第 n 个 Gold 序列的第 k 位信息。

C 即为经过 CDMA 编码以后的水印信息,经过二进制转换以后(对于 32×32 的二值图象信息量为 1024Byte),再进入下一阶段。在实验过程中, c_k 的最大值为 84,最小值为 -88。

1.4 DWT 变换及水印嵌入过程

相对于离散余弦变换 DCT 而言,首先由于离散小波变换 DWT 具有多分辨率特性,而且具有分层特性^[15~17],其能使得水印的嵌入和检测可在某个子带或某几个子带进行;其次由于 DWT 符合视觉特性^[16],即小波变换的特性跟人类视觉系统是相互吻合的;再者,由于小波变换的时频局部化特性,其特征化和定位攻击的能力更强,并且 DWT 的运算量比 DCT 的运算量小,因此,为了增强水印的稳健性和提高运算速度,在嵌入水印时选择小波变换域。

通过选择可分离的滤波器组,对输入图象进行三级小波分解。在 DWT 域,由于图象的大部分能量集中在低频子带,且把水印加在低频系数的水印图象不会出现方块效应,因此水印应当嵌入在小波图象低频系数中,但是实践证明,当嵌入的数据量较大时,低频系数则受到一定的限制,即水印嵌入密度比较大时,对视觉影响比较大,且 PSNR 值下降大。因此,根据文献[17,18]的结论,选择 HL_2, LH_2, HL_3, LH_3 及 LL_3 等几个子带嵌入水印,并按如下公式把待嵌入的二进制数据 $\{c_k(x_i)\}$ 嵌入到不同的子带中,其中, x_i 为 c_k 中的第 i 位信息

$$HL_2 = \begin{cases} HL_2 - HL_2 \bmod(32) + 12 & \text{if } (c_k(x_i) = 1) \\ HL_2 - HL_2 \bmod(32) + 0 & \text{if } (c_k(x_i) = 0) \end{cases} \quad (5)$$

经计算,对于字符水印,经过 CDMA 编码后得到的待嵌入二进制数据为 512Byte,此时 Lena 图象的 PSNR 为 45.05dB,嵌入字符串水印的图象如图 3(b)所示,嵌入二值图象水印的 Baboon 图象的 PSNR 为 39.20dB,嵌入水印后图象如图 3(d)所示。其中,二值图象水印为中山大学图标,如图 4(a)所示。



图 3 水印的不可见性效果

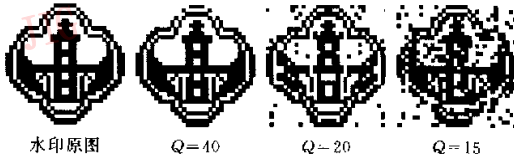


图 4 JPEG 压缩后检测出的水印图象

2 水印检测过程

类似于 CDMA 通信系统接收端解调的过程,在水印的检测过程中,也是首先根据嵌入算法检测出所嵌入原始图象的信息;同时需用嵌入时的密钥来生成与接收端相同的 Gold 码的正交序列集,再计算每个 Gold 序列与 CDMA 序列的互相关函数,即可判断水印信息。这种检测时的密钥增强了水印信息的保密性能。

根据嵌入水印的算法,对加水印图象进行小波变换以后,再从相应的 HL_2, LH_2, HL_3, LH_3 及 LL_3 子带中提取出相应的最低有效位,即已嵌入的水印编码信息为 $S_k = HL_2 \bmod(32), \hat{c}_k(x_i)$ 的值有如下判断公式

$$\hat{c}_k(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } (S_k \geq 24) \\ 1 & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

将二进制形式的水印信息 $\hat{c}_k(x_i)$ 转换成整数向量形式为

$$\vec{C} = \{\hat{c}_k\} \quad (7)$$

根据正交序列的互相关函数特性,有如下判断公式

$$\mathcal{R}_n = \sum_k \bar{c}_k g_n(k) \begin{cases} > 0 & \text{if } (b_n = +1) \\ < 0 & \text{if } (b_n = -1) \end{cases} \quad (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, 512; n = 1, 2, \dots, 512$$

于是就得到一系列二进制的水印信息序列 $\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_m, \dots$, 其中, m 表示水印信息的位数。对于 32×32 大小的图标二值图象, $m \leq 1024$ 。

在不同的 JPEG 压缩因子 Q 的情况下检测出的水印如图 4 所示。由图 4 可以看出,当 JPEG 压缩因子为 15 时,依然可以分辨出水印图象。由此可见,在相同的条件下,其视觉效果明显优于文献[7]算法的效果。

3 抗 JPEG 压缩的稳健性能测试

在实验过程中,先分别在 Lena 图象和 Baboon 图象中嵌入 160bits 的字符信息和 32×32 图标二值图象水印的一半,然后在两种情况下,对嵌入水印的图象进行 JPEG 压缩,并对检测出的水印进行性能测试,其测试结果如表 1、图 5 所示。表 1 为水印图象抗 JPEG 压缩性能的测试结果,图 5 为抗 JPEG 压缩性能的分析图。将其同文献[6~8]的测试结果进行比较可见,无论从检测出的水印效果及抗 JPEG 压缩的性能都得到改善。

表 1 水印图象抗 JPEG 压缩性能

JPEG 压缩因子 Q	Lena 图象嵌入 20 字符 PSNR=45.01dB		Baboon 图象嵌入 20 字符 PSNR=39.13dB		Baboon 图象嵌入 32×16 二值图象 PSNR=39.20dB	
	PSNR(dB)	BER(%)	PSNR(dB)	BER(%)	PSNR(dB)	BER(%)
100	44.809	0	39.077	0	39.149	0
90	39.995	0	37.644	0	37.782	0
80	38.296	0	36.361	0	36.460	0
70	37.298	0	35.483	0	35.561	0
60	36.565	0	34.761	0	34.807	0
50	35.977	0	34.151	0	34.191	0
40	35.367	0	33.485	0	33.528	0.586
30	34.570	1.25	32.516	0	32.528	1.170
20	33.346	3.75	30.989	0	31.004	8.984
15	32.371	23.75	29.785	8.125	29.821	21.48

针对同类文献[8]的测试结果,也进行了对应的实验结果比较,即在 JPEG 压缩因子 Q 为 50 时,在 Baboon 图象中嵌入不同信息量的水印,其误码率 BER 的情况如表 2 所示.从表 2 比较结果情况来看,抗 JPEG 压缩的稳健性能已得到很好的改善.

表 2 Baboon 水印图象抗 JPEG 压缩的误码率(%)比较

算法	嵌入数据量(bits)			
	128	256	512	1024
文献[8]算法($Q=50$)	4.0	12.0	18.0	25.0
本文算法($Q=50$)	0.0	0.0	0.0	0.195
本文算法($Q=40$)	0.0	0.0	0.0	1.76
本文算法($Q=30$)	0.0	0.0	0.98	5.47
本文算法($Q=20$)	0.0	0.0	8.01	16.6

对于 CDMA 编码以后的水印信息 c_k 的统计分布应接近高斯分布,而且根据中心极限定理,呈高斯分布的水印具有难以被检测的优点^[5].此外,对于高斯攻击信道,呈高斯分布的水印信息 c_k 将具有最好的性能.其抗高斯噪声性能分析如图 6 所示.从 Baboon 图象中检测出的二值水印图象如图 7 所示.由于各方面条件不尽相同,因此没有合适的文献直接进行比较,但从图 7 直观来看,高斯噪声到达一定程度时,仍能检测出完整的水印,结果令人满意.

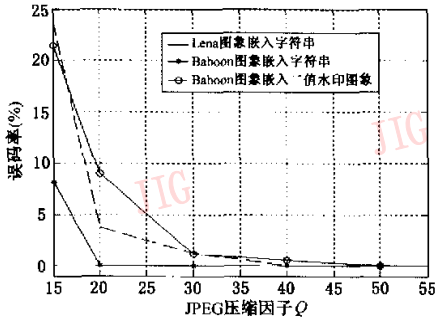


图 5 抗 JPEG 压缩性能分析

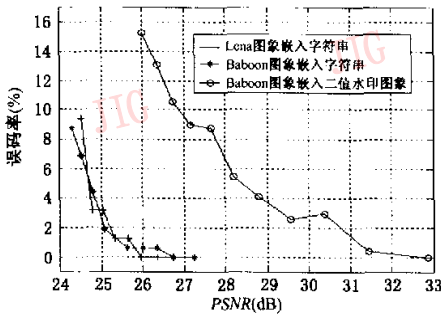


图 6 抗高斯噪声性能分析



图 7 不同的高斯噪声攻击时检测出的水印

针对 StirMark 的各种攻击进行了测试,在某些方面取得了比较满意的结果,其嵌入水印后图象峰值信噪比和误码率如表 3 所示,但由于未采取重同步等措施,因此抗几何攻击方面性能较差.由于篇幅所限,在此不再一一列出.

表 3 嵌入字符串的 Baboon 水印图象抗 StirMark3.1 性能

StirMark 攻击类别	PSNR(dB)	误码率(%)
base_2x2_median-filter	25.83	18.125
base_FMLR	30.88	5.625
base_Gaussian-filtering_3_3	31.74	0.625
base_ratio_x-0.80_y-1.00	33.91	0
base_ratio_x-0.90_y-1.00	36.20	0
base_ratio_x-1.00_y-0.90	36.56	0
base_ratio_x-1.10_y-1.00	31.58	0
base_ratio_x-1.20_y_1.00	33.47	0
base_scale-0.50	30.95	5.625
base_scale-0.75	34.69	0
base_scale-0.90	35.38	0
base_scale-1.50	35.08	1.25
base_Sharpning-3_3	21.03	28.75
base_stirmark-random-bend	17.01	40.00

4 结 语

本文探讨了利用 CDMA 技术在图象中嵌入有意义水印的问题,其主要研究内容和研究结果如下:

(1) 提出了一种采用 CDMA 直接序列扩频技术在图象中加入水印信息的新颖方法,即首先采用 m 序列优选对来生成 Gold 码的正交序列集,同时用改进的 Gold 序列对水印信息进行扩频来合并成 CDMA 编码,并进行调制;然后利用正交码的自相关函数特性检测出水印信息.实验证明,该算法由于采用了由改进的 Gold 码生成的 CDMA 扩频编码方法,因此水印的稳健性能好;另外,由于采用了 CDMA 码分多址复用技术,因此嵌入的信息量较大;并且由于水印检测时需提供原始密钥,因此隐藏信息的保密性好,不容易被截获.

(2) 实现了有意义水印的盲检测,由于采用 DWT 变换和性能优良的 Gold 序列,因此算法实现简单,运算速度快,计算量小。在盲检测的情况下,本算法除具有上述优点之外,其抗攻击性能已优于参考文献[6~8]算法;由 Lena 图象和 Baboon 图象的实验结果可见,本文算法嵌入水印图象的抗 JPEG 压缩性能及抗 Stirmark 攻击性能都得到改善,并且算法实现简单。

采用 CDMA 技术嵌入数字图象水印具有一定的优越性,由于选用的 Gold 序列的长度较大,本文只在 512×512 的灰度图象上嵌入了 128Byte 的信息,因此这方面仍有较大的改善余地,需要进一步研究。此外,本文着重重点在于研究水印的扩频编码方法,由于 DWT 系数不具有几何不变性特征,因此其所产生的水印抗几何攻击的性能较差。为了增强抗几何攻击性能,抽取过程中必须保证水印信息的同步。这方面的研究结果将另文发表。

参 考 文 献

- 1 黄继武,谭铁牛. 图象隐形水印综述[J]. 自动化学报,2000,26(5): 645~655.
- 2 Huang Jiwu, Shi Yun Q. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking [J]. IEE Electronics Letters, 1998,34(8):748~750.
- 3 黄继武,Elmasry G F,Shi Yun Q. 基于匹配滤波的图象水印算法[J]. 电子学报,2001,29(4):447~451.
- 4 朱近康. CDMA 通信技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2001.
- 5 Joseph J K, Dowling W J. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking[J]. Signal Processing. 1998, 66(3): 303~317.
- 6 Silvestre G C M, Dowling W J. Embedding data in digital images using CDMA techniques[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Vancouver, Canada 2000. 1: 589~592.
- 7 Kohda T, Ookubo Y, Shinokura K. Digital watermarking through CDMA channels using spread spectrum techniques [A]. In: IEEE 6th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications[C], Parsippany, NJ, USA, 2000, 2:671~674.
- 8 Boris Vassaux, Patrick Bas, Jean-Marc Chassery. A new CDMA technique for digital image watermarking enhancing capacity of insertion and robustness [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Thessalonica, Greece, 2001,3:983~986.
- 9 Bijan G M. Exploring CDMA for watermarking of digital video [EB/OL]. Villanova University, Villanova, PA, USA, 19085, <http://www.ece.villanova.edu/~mobasser/mypage/3657-10.pdf>.

- 10 Bijan G M. Direct sequence watermarking of digital video using m-frames[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Chicago, Illinois, USA, 1998, 2:399~403.
- 11 Bijan G M. Ordered bitplane watermarking of digital video by direct sequence spread spectrum [EB/OL]. <http://www.computer.org/proceedings/iw-mmdbms/8676/86760066abs.htm>.
- 12 Lee Yong-Hwan, Kim Seung-Jun. Sequence acquisition of DS-CDMA systems employing Gold sequences [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(6): 2397~2404.
- 13 林可祥,汪...飞. 伪随机码的原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1978.
- 14 Ruanaidh J J K O, Gabriella Csurka. A bayesian approach to spread spectrum watermark detection and secure copyright protection for digital image libraries [A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C], Fort Collins, Colorado, USA, 1999.1: 207~212.
- 15 Wang Yu-Pin, Chen Mei-Juan, Cheng Po-Yuen. Robust image watermark with wavelet transform and spread spectrum techniques [A]. In: Conference Record of 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C], Pacific Grove, CA, USA, 2000,2:1846~1850.
- 16 Hsieh Ming-Shing, Tseng Din-Chang. Hiding digital watermarks using multiresolution wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001,48(5):875~882.
- 17 Tsai Min-Jen, Yu Kuang-Yao, Chen Yi-Zhang. Joint wavelet and spatial transformation for digital watermarking[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(1): 241~245.
- 18 黄达人,刘九芬,黄继武. 小波变换域图象水印嵌入对策和算法[J]. 软件学报,2002,13(7):1290~1297.

方艳梅 1966年生,中山大学电子与通信工程系在职博士研究生,工程师,1988年毕业于西北工业大学航空电子工程系,2000年获中山大学电子与通信工程系硕士学位。现主要从事图象数字水印、多媒体信号处理与通信等方面的研究工作。



黄继武 1962年生,工学博士、IEEE高级会员,先后获西安电子科技大学、清华大学、中国科学院自动化研究所学士、硕士、博士学位。现为中山大学电子与通信工程系教授、博士生导师、《中国图象图形学报》编委、IEEE电路与系统学会“Multimedia Systems and Applications”技术委员会成员。目前主要研究方向为信息隐藏与数字水印技术、多媒体信号处理。

