

基于匹配滤波的有意义图像水印算法

黄继武¹, G. F. Elmasry², 程卫东³, Yun Q. Shi²

(1. 中山大学电子与通信工程系, 广州 510275;

2. Dept. of ECE, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA;

3. 成都信息工程学院电子系, 成都 610041)

摘要: 图像隐形水印是解决数字媒体版权保护的有效手段。目前的大多数水印算法采用伪随机序列构成水印,因而只能给出“ Yes ”(有水印)或“ No ”(无水印)的回答。嵌入有意义的水印在一些应用场合更加重要,但同时也带来了更多的困难。嵌入有意义的水印必须解决二个问题:(1)嵌入的水印具有一定的数据量;(2)从有失真的水印图像中正确地提取嵌入的水印。本文应用数字通信的理论和方法,提出了一个嵌入有意义字符串的DCT域隐形水印算法。该算法采用BCH编码和匹配滤波来降低误码率。应用所提出的算法,把一个32个字符组成的水印嵌入到256×256的图像中并达到了较好的稳健性。在水印图像信噪比受Gaussian加性噪声干扰下降到26dB时,仍实现了对嵌入水印零错误概率的检测。

关键词: 图像隐形水印; 有意义水印; 信息隐藏; 匹配滤波; BCH

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04-0447-05

An Algorithm for Meaningful Watermarks Based on Matched Filtering

HUANG Ji-wu¹, ELMASRY G. F.², CHENG Wei-dong³, SHI Yun Q.²

(1. Dept. of Electronic and Communication Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Dept. of ECE, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA;

3. Dept. of Electronics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China)

Abstract: Invisible image watermarking is an effective method to provide protection for copyright ownership of digital media. Most image watermarking algorithms use pseudo random sequences as watermarks and so they can only give the answer of “ Yes ” or “ No ”. Embedding meaningful watermark is important in some applications but results in more difficulties. There are two problems in embedding meaningful watermark as follows: (1) the embedded watermark must have a certain bit rate. And (2) the embedded watermark must be detected correctly from possibly distorted watermarked image. In this paper, we apply the theory and methods in digital communication to watermark embedding and propose an invisible image watermarking algorithm in DCT domain for embedding meaningful watermarks. The algorithm reduces error probabilities of detection by exploiting BCH code and matched filtering. With the proposed algorithm, we embed a meaningful watermark composed of 32 characters into an image of 256 × 256 and the watermark thus generated is robust. The watermark can be detected with zero error probability even if the quality of watermarked image is as poor as 26 dB in PSNR after corrupted by additive Gaussian noise.

Key words: invisible image watermarking; meaningful watermark; information hiding; matched filtering; BCH

1 引言

数字媒体(数字图像、数字视频、数字音频等)的版权保护已成为一个迫切需要解决的问题。传统的加密系统在数据传输过程中虽有保护作用,但数据一旦被接收并解密,其保护作用也随着消失。因此只能满足有限的要求^[1,2]。

作为数字媒体版权保护的有效手段^[3,4],数字水印(digital watermarking)技术近年来引起了人们的极大重视。图像隐形水印(Invisible Image Watermarking)是其中最主要的研究方向。它

通过在原始数据图像中嵌入秘密信息-水印来证实该图像的所有权归属或保证数据的完整性。

稳健性(robustness)是目前图像隐形水印技术研究的重要内容。大多数水印算法采用伪随机序列(Gaussian噪声^[3]、均匀分布噪声、二进制伪随机数^[5])来构成水印,并采用假设检验(相关检测)^[3]来检测被测试图像中是否包含有水印。尽管一些算法^[3,6]产生了稳健的隐形水印,但这些用随机序列构成水印的算法只能给出“ Yes ”(有水印)和“ No ”(无水印)的回答。

收稿日期:1999-07-12;修回日期:2000-10-30

基金项目:国家自然科学基金(No. 69975011);广东省自然科学基金(No. 980442);广州市重大科技攻关项目(No. 2000-2-004-01);教育部重点科技项目

换句话说,放进图像的秘密信息实际上仅为 1bit.

利用随机序列作为水印,对一些应用是合适的.然而,在另一些应用场合,对嵌入图像的信息可能会有更高的要求.正如 Craver 等^[7]所分析,由随机序列构成的水印作为所有权识别时,有时会存在不确定性问题.在许多应用场合,要求嵌入图像的信息是可读的或可视的,如有意义的文字串(所有者姓名、地址、标志等)或者一个二维图像(商标、印鉴等).这种有意义的水印与无意义的伪随机噪声相比,所具有的优点是不言而喻的.

与嵌入伪随机噪声序列不同,嵌入有意义的水印将带来一些新的问题:

(1) 水印的检测要求有极高的正确率.当水印为有意义的文字串时,哪怕 1bit 的错误,都会影响到整个水印的效果.因此,对有意义的可读水印,要求有足够低(甚至为零)的检测错误概率.由于嵌入水印的图像存在因信号处理和噪声干扰引起失真的可能性,这就给水印的嵌入和检测带来了许多问题.

(2) 有意义水印通常具有一定的数据量.在主图像尺寸一定的情况下,为了满足不可见性,嵌入过程将更加困难.

(3) 当水印为有意义的文字串时,仍然需要保留伪随机序列的一些优点,如随机性、秘密性等,以防止人为的攻击.

通常,在保证不可见性的前提下,可嵌入图像的信息的数据量依赖于几个因素:

(1) 图像的尺寸.这个因素是显然的,图像尺寸越大,可嵌入的信息越多^[8].

(2) 嵌入对策^[9].在空域还是频域嵌入水印、在哪些分量嵌入、嵌入强度多大都直接影响可允许嵌入的信息量.

(3) 噪声强度.嵌入水印的图像可能遭遇信号处理或噪声干扰而导致失真.不论何种情况,均可视为在水印图像上迭加噪声.为了使嵌入的信号能被正确检测,噪声越强,允许嵌入的信号的量越小.

嵌入有意义的水印属于数据隐藏(data hiding)技术的范围,近年已引起了人们的注意并可能成为未来图像水印技术研究的一个重要研究方向. Bender 等^[10]讨论了几种可能用于数据隐藏的技术并提出了二个实现数据隐藏的方法:统计的方法和视觉的方法.从方法分析,其抗失真性能不会太好.一些研究者^[8,11,12]探讨了图像容量问题.他们把数据隐藏等价为一个数字通信问题,并试图回答一定分辨率的图像允许嵌入多少数据.尽管这类研究十分有意义,但由于嵌入的数据量与许多因素有关,要准确回答这个问题是困难的. Delaigle 等^[13]所提出的算法在一幅 512 × 512 的图像中隐藏了 165bits 的信息.其主要缺点是嵌入的数据量太少,稳健性也不是很好. Hernandez 等^[14]把数据隐藏和水印嵌入过程模型化为一个通信系统,理论上分析隐藏了数据的图像在受到加性噪声干扰、裁剪和线性滤波后所引起的误码率和水印作为所有权识别时的特性变化.一般说来,在不可见性的要求下,水印的稳健性和水印的数据量构成一对矛盾.在一定的图像尺寸下,嵌入的数据量越大,稳健性越差.

本文应用数字通信的理论和方法,提出了一个嵌入有意义字符串的 DCT 域水印算法.该算法采用如下二种技术:(1)

应用 BCH 编码来生成最大可分离信号集;(2) 应用匹配滤波以达到最佳的检测效果.应用所提出的算法,把一个 32 个字符组成的水印嵌入到 256 × 256 的图像中并达到了较好的稳健性.

2 基于 DCT 域的数据隐藏算法

考虑到在变换域上嵌入水印比在空域上具有更多的优点^[6],所提出的信息隐藏算法在 DCT 域上实现.

原始图像 $f(x, y)$ 被分割为互不覆盖的图像块 $f_k(x, y)$, $0 \leq x, y < 8, 0 \leq k < K$. 对 $f_k(x, y)$ 进行 DCT 变换,得到 $F_k(u, v)$.

有意义水印 w 由长度为 L 的 ASCII 字符串构成,即 $w = \{C_i; 0 \leq i < L\}$, C_i 为 ASCII 字符.在本文中, C_i 被限制在最常用的 64 个字符(包含字母、数字和标点,这在一般的情况下是够用的),以减少嵌入信息的数据量.从原理上讲,用二进制表示的字符 C_i 可以被直接嵌入主图像中,但在水印图像存在失真的情况下,嵌入数据将很有可能被改变,从而导致检测信息的错误.借助信道编码的方法^[15],可以降低这种错误.应用 BCH 编码, C_i 被映射为另一二进制序列 X_i :

$$C_i \xrightarrow{\text{BCH coding}} X_i \{x_{ij}; x_{ij} \in \{0, 1\}, 0 \leq j < r\}$$

其中 r 为 BCH 的码长.为了实现上述映射,应用 BCH 编码 $(r, 6)$ 的生成多项式^[15],设计了有 64 个入口的信号集 $S = \{S_m, 0 \leq m < 64\}$,每个入口对应于所用的 ASCII 字符集中的一个字符.对于 $r = 31$,生成多项式系数用八进制表示如下^[15]:

$$g(z) = \{313365047\}$$

将有意义水印的每个字符经过 BCH 编码,可得到待嵌入主图像的二进制数据 X :

$$X = \{X_i; X_i = \{x_n; x_n \in \{0, 1\}, 0 \leq n < L \cdot r\}$$

数据嵌入可表示为:

$$F_n = \begin{cases} F_n + & , & x_n = 1 \\ F_n - & , & x_n = 0 \end{cases} \quad F_n \quad R$$

其中, R 为用来嵌入水印数据的 DCT 系数,它是所有 $F_k(u, v)$ 构成的集合的一个子集. F_n 为水印信号振幅,其选择原则是在满足不可见性的前提下,尽可能选择大的值.在本文中,根据实验结果,选 R 等于 6.

令 $F_k^*(u, v)$, $0 \leq k < K$, 为降质的水印图像,则嵌入水印的 DCT 系数可表示为:

$$F_n^* = F_n + N_n, \quad F_n^* \quad R$$

其中, N_n 为水印图像失真引起的等效噪声.于是,抽取的嵌入数据(模拟信号)为:

$$y_n^* = F_n^* - F_n = \pm N_n$$

以 BCH 码长 r 对 y_n^* 分段,得到 y_{ij}^* , $0 \leq i < L, 0 \leq j < r$, 对 y_{ij}^* 应用匹配滤波的方法,可以得到检测的水印 w^* , $w^* = \{C_i^*; 0 \leq i < L\}$.

3 误码纠错与匹配滤波

图像隐形水印技术本质上是在较强的主图像信号之上迭

加一个对视觉没有影响的弱信号. 由于嵌入水印的图像在传播过程中可能会导致失真. 因此, 从数字通信的角度, 水印编码(嵌入)可理解为在一个宽带信道(原始图像)上传输一个窄带信号(水印), 该信道有可能受到噪声的干扰. 水印的译码(检测)则是一个有噪信道中弱信号的检测问题.

为了减少错误概率, 一个比较直接的方法是采用某种形式的纠错编码. 然而以下的分析和实验表明, 匹配滤波是较纠错编码更好的方法.

信号功率²受不可见性的限制是一定的. 而降质水印图像的失真度(等效为噪声功率)是客观存在所决定的. 因此, 水印嵌入可认为是一个功率受限(power-constrained)的通信问题. 对于嵌入有意义字符串的命题, 可描述为: 对于一个给定图像中 N 个用来嵌入水印的系数、水印信号功率²以及一定的噪声功率, 什么是最好的水印编码/译码方法?

有意义字符串水印由英语字母、数字和标点符号构成(64个符号), 采用一个 6bits 的码书. 编码时, 由字符的 ASCII 码值计算其在码书中的位置, 可得到该字符的编码值. 译码时, 确定所检测字符在码书中的入口, 进而译码成相应的字符.

应用上述码书, 对于相同的编码率, 仿真并实现了多重嵌入、纠错编码和匹配滤波三种情况. 实验图像为 256 × 256 × 8 的“Lena”图像(图 3(a)), 采用每个 8 × 8 块的三个低频 AC 系数 $F(1,0)$ 、 $F(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 来嵌入水印(因此, $N = 3072$). 水印信号强度为 $\alpha = 6$.

3.1 多重嵌入

多重嵌入方法由 Kutter 等^[16]提出, 把待嵌入的二进制序列(水印字符的 ASCII 值)的每 bit 重复 M 次(即同一 bit 的数据同时嵌入到不同的 DCT 系数). 在我们的实验中, 重复次数为 $M = 5$.

$$C_i = \frac{\text{ASCII}}{b_i} \times \frac{\text{repeating } M \text{ times}}{x_{ij}} \times y_{ij} \quad M \cdot i \leq j < (M+1) i$$

b_i 为将嵌入图像的二进制数据. 检测时采用最大似然 (ML, Maximum Likelihood) 方法来译码所提取的待测水印信号. 即存在二种假设:

$$H_1: + N_n, H_0: - + N_n$$

H_1 和 H_0 分别对应于译码“1”和“0”. 设“1”和“0”等概率出现, 利用最大似然译码^[17]来决定每一比特是“0”还是“1”. 当 $\pm + N_n > 0$ 时, 所检测信号被确定为“1”, 否则为“0”. 对每个 M bits 的二进制数, 采用多数表决 (majority voting) 方法确定其应为“0”还是为“1”.

$$y_{ij}^* \frac{\text{ML}}{x_{ij}} \times \frac{\text{majority voting}}{b_i} \times \frac{\text{ASCII}}{C_i}$$

其中 y_{ij}^* 为检测到的模拟信号, b_i^* 为判定的二进制数据. 多重嵌入的方法等效于在一个给定的通信信道上通过重复发送并利用多数表决来纠错的情况.

3.2 纠错编码

在实验中, (31, 6) 的 BCH 纠错码被应用. 每一个 6 bits 的 ASCII 码利用 BCH 码被映射成 31 bits 的码字, 任意二组码字的 Hamming 距离为 15, 即至少有 15 bits 不同. 嵌入过程如下所示:

$$C_i \frac{\text{BCH coding}}{x_{ij}} \times y_{ij}, 0 \leq j < r$$

当检测水印时, 先利用最大似然译码决定所抽取的信号每 1bit 是“0”还是“1”. 然后, 每 31bits 的二进制序列利用 BCH 译码成 6bits 的码以决定所检测的字符.

$$y_{ij}^* \frac{\text{ML}}{x_{ij}} \times \frac{\text{BCH decoding}}{C_i}$$

这种方法等效于在一个给定通信信道上通过 BCH 纠错编码来纠正传输错误的情况. 根据纠错编码的原理^[15], (31, 6) 的 BCH 码可以在 31bits 中纠正 7 个错误.

3.3 匹配滤波

采用与 BCH 编码相同的方法, 我们构造了一个具有 64 个信号的信号集 $S = \{S_m, 0 \leq m < 64\}$. 每个信号有 31bits, 对应于一个维数为 31 的匹配滤波器. 信号集中的信号为最大可分离信号, 任意二个信号之间的 Hamming 距离为 15, 码率与 BCH 码相同. 嵌入过程同于纠错编码.

译码时, S_m 中的“0”和“1”分别被转换为 - 和 +, 得到 S_m^* . 将所抽取的信号(模拟) y_{ij}^* 分割为长度为 r 的接收信号 S_i^* , 然后计算 S_i^* 与所有匹配滤波器的相关. 确定具有最大相关输出的匹配滤波器为译码后的信号(二进制).

$$y_{ij}^* \times S_i^* \frac{\text{matched filtering}}{C_i}$$

设 y_{ij}^* 和 x_j^m 分别代表接收信号 S_i^* 的幅度 ($\pm + N_n$) 和信号集中第 m 个信号 S_m 的幅度 (\pm), 则接收信号和第 m 个信号的相关为

$$m(S_i^*, S_m) = \frac{\sum_{j=0}^{r-1} (y_{ij}^* \cdot x_j^m)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{r-1} (y_{ij}^*)^2}}$$

其中 r 为匹配滤波的维数, 即 $r = 31$. 对于某一 $m_0, 0 \leq m_0 < 64$, 如果

$$m_0(S_i^*, S_{m_0}) \geq m(S_i^*, S_m), 0 \leq m < 64$$

则 m_0 被确定为译码信号的入口, 所对应的字符即为检测到字符.

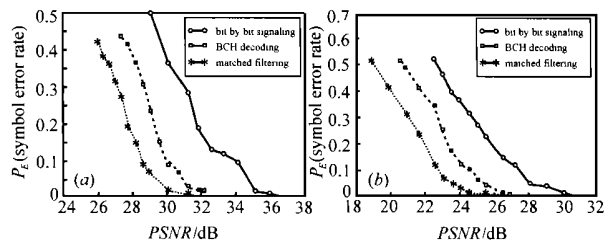


图 1 三种水印编码方法的性能比较. (a) “Lena”图像的结果. (b) “Baboon”图像的结果.

图 1 给出了应用上述三种方法对嵌入图像的字符串在不同噪声强度下的检测错误概率 P_E . 实验表明, 重复嵌入的性能最差. 其原因是重复嵌入对于信号的功率和误码纠错的使用最差. 文献^[18]指出, 对于功率受限信号, 与发送 r 维信号相比, 一比特一比特的发送更易受到信道噪声的影响. 文献^[19]也指出重复发送码并不被推荐为信道编码. 事实上, 多数表决方法用于纠错时对于错误的分布有特殊要求, 其纠错能力是有限的. 第二种情况利用了 BCH 纠错编码, 性能比重复

嵌入有所改善,但仍然为一比特一比特的传送模式.通过纠错编码可以获得编码增益.但在信号功率受限的情况下,仍比不上匹配滤波器.匹配滤波在三种方法中取得了最佳的效果.注意到三种方法的编码率相同.

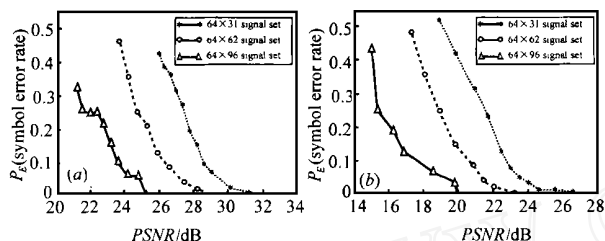


图2 错误概率与信号维数的关系。(a)“Lena”图像的结果。(b)“Baboon”图像的结果。

通过增加信号维数可以提高信号功率也可以获得编码增益.图2给出了利用不同维数的信号集和匹配滤波器的结果.通过增加信号/滤波器的维数,我们可以容许更强的信道噪声.当然,随着信号/匹配滤波器维数的增加,可允许嵌入图像的字量将相应减少.



图3 实验结果。(a)原始图像。(b)嵌入字符串水印后的图像(44.0dB);(c)水印图像受噪声干扰后的结果(26.0dB)。

在维数为96的情况下,嵌入一个32个字符的字符串“NEW JERSEY INSTIT. OF TECH. 1998”作为水印(图3(b),44.0dB),嵌入水印的图像在受到Gaussian噪声干扰以致于PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)下降到低于26dB(如图3(c)所示)时,该字符串仍可被正确地提取出来.对于“Baboon”图像,由于其纹理比“Lena”复杂而允许嵌入更多的水印信号能量,因而水印具有更好的稳健性.当嵌入水印的图像的PSNR值在受到Gaussian噪声干扰下降到20dB时,隐藏的字符串仍可正确的检测。

在产生信号集时,编码机制应用Bernoulli试验产生了随机的二进制串,其中“0”和“1”的出现概率为1/2.因此,尽管水印是一个有意义的字符串,但最终嵌入图像的信号却保留了随机的特征,这有助于提高水印的秘密性以增强抗攻击性能。

4 结论

本文探讨了在图像中嵌入有意义水印的问题.主要研究内容和研究结果如下:

(1)实现并比较了不同的有意义水印的编码和解码方法,证实了采用匹配滤波器的功率受限方法是实现有意义水印嵌入的有效方法.也证实了检测的错误概率可以随着信号/滤波器的维数的增加而降低.这告诉我们,当嵌入有意义水印时,在一定的噪声功率下,需要在错误概率和水印尺寸上进行折

衷.在要求零错误概率时,或者需要对噪声功率有一定的限制,或者减少水印尺寸以增加信号/滤波器的维数。

(2)实现了一个有意义水印的算法.在256×256的图像上,所实现的水印可以包括32个字符.在嵌入水印的图像的PSNR受Gaussian噪声干扰而下降到26dB的情况下,水印仍能被正确检测.文献[13]所提出的算法在512×512的图像上隐藏了165bits的信息,在噪声干扰下,实现完全正确检测的条件是图像的PSNR在28dB以上.可见,本文算法在隐藏数据量、稳健性等方面均优于文献[13]的算法。

(3)由于嵌入的水印为有意义的字符串,使得水印在作为所有权识别上更加可靠.当水印由随机序列构成时,水印攻击者有可能在没有原始水印的情况下,使相关检测器产生较强的输出^[7].但要伪造有意义的字符串,则要困难得多.同时,最终嵌入图像的水印数据呈现随机特性,其与字符串的映射关系只有水印所有者知道,要破译水印是十分困难的。

在文献[3]中,一个随机序列被嵌入图像中.检测时,当相关检测器输出较大时,译码为“1”;否则,译码为“0”.即信号集只有二个入口,相当于只嵌入了1bit的信息而采用了很高的信号/匹配滤波器的维数,即使水印信号由于图像失真而产生了一些变化,相关检测器仍有可能达到较强的输出,因而抗噪声的能力比较强.受不可见性的影响,在本文算法中,我们需要用相同长度的随机序列来携带更多的信息.原理上,相当于我们将抽取的长序列分段并计算与信号集中信号的相关.因此,相关的序列长度大大缩短,其稳健性能也必将随着下降.然而,由于有意义的水印具有许多随机序列水印不具有的优点,还是有较大的实用价值。

参考文献:

- [1] M. Macq, J.-J. Quisquater. Cryptology for digital TV broadcasting [A]. Proc. IEEE [C], 1995, 83(6): 944 - 957.
- [2] J. Zhao, E. Koch. In business today and tomorrow [J]. Communications of the ACM, 1998, 41(7): 67 - 72.
- [3] I. J. Cox, J. Killian, F. T. Leighton, T. Shamoon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.
- [4] M. D. Swanson, M. Kobayashi, A. H. Tewfik. Multimedia data embedding and watermarking technologies [A]. Proc. IEEE [C], 1998, 86(6): 1064 - 1087.
- [5] D. Kundur, D. Hatzinakos. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion [A]. Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing [C], 1997, (1): 544 - 547.
- [6] 黄继武, Yun Q. Shi. 一种自适应图像水印算法 [J]. 自动化学报, 1999, 25(4): 476 - 482.
- [7] S. Craver, N. Memon, B.-L. Yeo, M. M. Yeung. Resolving rightful ownerships with invisible watermarking techniques: Limitations, attacks, and implications [J]. IEEE J. Select. Areas Comm., 1998, 16(4): 573 - 586.
- [8] J. Huang, G. F. Elmasry, Yun Q. Shi. Power constrained multiple signaling in digital image watermarking [A]. Proc. of 1998 IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing [C], 1998, LA, USA: 388 - 393.

- [9] 黄继武, Yun Q. Shi. DCT 域图像水印:嵌入对策和算法 [J]. 电子学报, Apr. ,2000 ,28 (4) :57 - 60.
- [10] W. Bender ,D. Gruhl ,N. Morimoto ,A. Lu. Techniques for data hiding [J]. IBM System Journal ,1996 ,35 (3/4) :313 - 337.
- [11] M. Barni ,F. Bartolini ,V. Cappellini ,A. Piva. Capacity of the watermark-channel : How many bits can be hidden within a digital image [A]. Proc. SPIE 3657 : Security and watermarking of Multimedia Contents [C] ,San Jose ,1999.
- [12] S. D. Servetto ,C. I. Bdilchuk ,K. Ramchandran. Capacity issues in digital image watermarking [A]. Proc. 1998 IEEE Int. Conf. on Image Processing [C] ,Chicago ,1998.
- [13] J. -F. Delaigle ,C. De Vleeschouwer ,B. Macq. Watermarking algorithm based on a human visual model [J]. Signal Processing ,1998 ,66 (3) : 319 - 335.
- [14] J. R. Hernandez ,F. P. Gonzalez ,J. M. Rodriguez ,G. Nieto. Performance analysis of a 2-D multipulse amplitude modulation scheme for data hiding and watermarking of still images [J]. IEEE J. Select. Areas Comm. ,1998 ,16 (4) :510 - 524.
- [15] B. Sklar. Digital Communications : Fundamentals and Applications [M]. Englewood Cliffs ,NJ ,USA ,Prentice-Hall Inc. ,1988.
- [16] M. Kutter ,F. Jordan ,F. Bossen. Digital signature of color image using amplitude modulation [A]. Proc. of SPIE :EI 97 [C] ,Feb. ,1997.
- [17] S. G. Wilson. Digital Modulation and Coding [M]. Englewood Cliffs , NJ ,USA ,Prentice-Hall Inc. ,1996.
- [18] J. M. Wozercraft ,I. M. Jacobs. Principle of Communication Engineering [M]. Waveland Press ,Inc. ,1990.
- [19] S. Lin ,D. J. Costello. Error Control Coding ,Fundamentals and Applications [M]. Englewood Cliffs ,NJ ,USA ,Prentice-Hall ,Inc. ,1983.

作者简介:



黄继武 博士,中山大学电子与通信工程系教授、IEEE 高级会员、《中国图像图形学报》编委、广东省图像图形学会常务理事。发表论文近 50 篇。主要研究方向为图像处理、图像压缩编码、数字水印技术。

程卫东 成都信息工程学院电子系副教授、中国电子学会高级会员。以第二、第三主研身份参加过“七五”、“八五”及省部级的科研多项,发表论文 12 篇。主要研究方向为图像通信、图像压缩编码、数字水印技术。

Yun Q. Shi 博士,美国新泽西理工学院电气与计算机工程系教授、IEEE 高级会员。曾任 IEEE Transactions on Signal Processing 副主编和其它国际刊物的客座主编。出版著作 2 部,发表论文近 100 篇。主要研究方向为数字水印、图像处理、视频编码、多维系统和信号处理、图像序列分析和模式识别等。入编 Marquis Who's Who.