

基于直接序列扩频码的图像空间域水印技术*

周利军, 周源华

(上海交通大学 图像通信与信息处理研究所, 上海 200030)

E-mail: ljzhou@lucent.com; yhzhou@mail.sjtu.edu.cn

http://www.sjtu.edu.cn

摘要: 提出了一种基于直接序列扩频码的图像空间域水印方案. 在建立数字图像水印的通信模型的基础上, 通过生成原图的视觉掩模以充分保证图像的逼真度, 在数字图像相应的空间域嵌入扩频码调制水印, 同时利用纠错编码技术来进一步增强水印的抗干扰性能. 水印的检测通过计算像差图像和原扩频码的相关性来实现. 实验表明, 该方案提高了数字水印的稳健性和隐蔽性, 具有较好的主观效果.

关键词: 数字图像水印; 直接序列扩频; 视觉掩模; 纠错编码

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

随着计算机通信和全球互联网的迅速发展, 数字信息的传输和利用越来越频繁和广泛. 由于数字信息极易被无失真复制, 使得版权侵权现象成为信息产业的一大障碍. 而传统的加密技术只能提供小范围的保护, 并且具有安全性不足和流通性较差的特点.

数字水印技术可以有效解决传统版权保护中的不足, 被认为是未来数字信息最好的版权保护方式. 数字水印是指嵌入并存在于数据中的不可见识别码或标记, 具有难以去除和破坏等特点, 可以用来跟踪和保护数字媒体的版权以及其他信息. 由于目前大多数的数字信息是图像, 并且图像具有直观性, 因此对于数字水印的研究主要侧重于图像领域.

扩频是一种新型的通信方式, 具有抗干扰、抗噪音、抗多径衰落、低功率谱密度、保密性好等许多优点. 直接序列扩频作为最常用的扩频技术, 应用到数字图像水印技术中, 可以显著增强系统的稳健性和安全性.

本文首先建立了数字图像水印技术的通信模型, 在此基础上引入了图像空间域视觉掩模的概念, 并将通信中的误差纠错编码技术运用到水印信息嵌入和恢复过程中, 实践证明该方法比一般的扩频水印方案有更好的稳健性和主观效果.

1 方案

1.1 数字图像水印的通信模型

从通信角度来看, 原始图像(cover-image)可以被认为是近似连续幅度的、二维的、有限带宽的并具有较大平均噪声功率的信道; 欲嵌入的数字水印是信息或信号; 而对水印图像(stego-image)的攻击可以被看做是在信道中引入的失真或畸变. 数字图像水印的通信模型^[8]可由图 1 表示.

* 收稿日期: 2000-05-20; 修改日期: 2000-08-07

作者简介: 周利军(1972 -), 男, 上海人, 博士生, 主要研究领域为图像处理与多媒体技术; 周源华(1940 -), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为图像处理与多媒体技术, 图像通信, 信息处理.

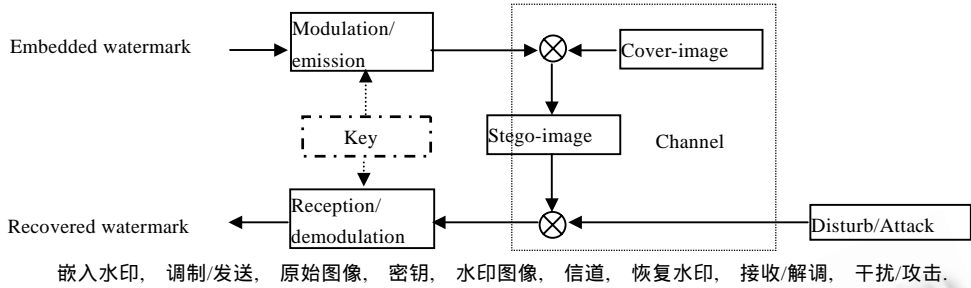


Fig. 1 Communication model of digital Image watermarking

图 1 数字图像水印的通信模型

可见,数字图像水印技术非常接近于典型的通信理论.因此,许多在连续信道上进行调制通信的方案,都可以作为数字水印技术的潜在方案,这就为扩频以及纠错编码^[2]技术在数字水印技术中的应用奠定了基础.

1.2 直接序列扩频码^[1]

扩频技术利用同欲传输信号无关的码对被传输信号扩展频谱,使之占有远远超过被传送信号所必需的最小带宽.在接收机中利用同一码对接收信号进行同步相关处理以解扩和恢复数据.

扩频技术的基本理论根据是信息论中的香农(Shannon)公式,它可以表示为

$$C = W \log_2 (1 + S / N). \quad (1)$$

式(1)中, C 是信道容量,在此表示为 bits/pixel, W 是信道带宽, N 是噪声功率, S 是信号功率.香农公式表明了一个信道无误差地传输信息的能力同存在于信道中的信噪比以及用于传输信息的信道带宽之间的关系.

在干扰环境中 $S / N \ll 1$,式(1)经变换可得:

$$W = \frac{1}{1.44} C \cdot N / S. \quad (2)$$

由式(2)可以看出,对任意给定的噪声信号比,只要增加用于传输信息的带宽,理论上就可以增加在信道中无误差地传输的信息率.同样道理,在一个干扰远大于信号的系统中,只要将欲传输的信息先用某种方式扩展其频谱,再把接收的扩频信号的频谱变换到原始信息带宽,就可以大大提高信噪比.

我们采用的直接系列扩频就是一种常用的扩频技术,它是用一数字编码序列直接调制发射信号,由于编码序列的带宽远大于原始信号带宽,从而扩展了发射信号频谱.一般使用伪随机序列作为编码序列,在此我们使用 m 序列^[1,3]作为扩频码.

m 序列又称最大长度序列,它是由 n 级二进制线性反馈移位寄存器产生的周期为 $2^n - 1$ 的伪随机序列,由 0 和 1 组成.

可以证明^[1], m 序列是具有零均值、周期性和平衡性的二值化伪随机序列,最主要的是它有十分良好的自相关特性.周期为 $p=2^n-1$ 的 m 序列自相关值为

$$\begin{cases} \rho(0) = 1 \\ \rho(i) = -1/p, & 1 \leq i \leq 2^n - 2, \end{cases} \quad (3)$$

由于其旁瓣很小,当 n 很大时旁瓣接近于 0,自相关值呈现尖峰状,因此可以用来可靠地检测和恢复水印信息.

从水印信息的安全性考虑, m 序列周期越长,对其破解就越困难.此处采用级数为 10,周期为 1023 的 m 序列,为了便于调制和解调水印信息,将 m 序列元素由 $\{0,1\}$ 映射为 $\{1,-1\}$,即 0 1,1 -1,同时能够保证水印信息的均匀性且不影响图像的平均亮度.

1.3 视觉掩模

许多空间域水印算法较少考虑视觉特性^[6-8],如果在图像的平滑部分或灰度变化较小的区域加入水印,就很容易引起主观视觉上与原图的差异,详见实验.因此,我们考虑生成基于图像内容的视觉掩模^[4],也就是预先选

择出图像中人眼视觉不太敏感的区域,例如纹理密集和明暗变化明显的部分.在这里我们采用 Canny 算子^[5]先对原图进行边缘提取,Canny 算子运用了高斯平滑滤波和水平及垂直方向的数值差分,得出图像的梯度分布,寻找出梯度的局部最大值,然后通过设定高低两个阈值确定图像边缘线条.

1.4 水印的嵌入

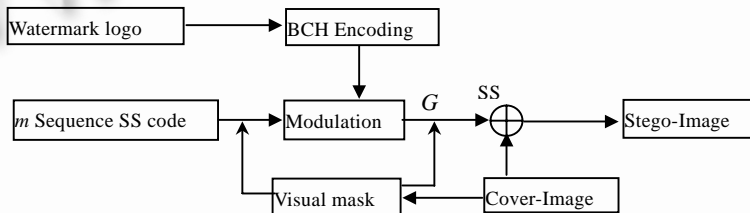
以 16×16 的二值黑白图“Playboy”作为欲嵌入的水印标记.实际的水印图像在传输过程中容易受到各种信号干扰和攻击,就会在水印检测时产生误码.为了减少误码,增强水印的抗干扰性能,我们采用了误差纠错编码技术^[2],当然这也会增加水印信息冗余量.这里使用 BCH(bose-chaudhuri-hocquenghem)二进制分组纠错编码,对水印信息进行预编码.考虑到编码效率与纠错能力的平衡,使用 BCH(7,4)编码,码长为 7,信息位是 4,可以在 7 位码元中纠错 1 位.

接下来用 m 序列调制经过 BCH 编码的水印信息,采用类似于二相相移键控(binary phase shift keying,简称 BPSK)^[1,2,6]的调制方法,对水印信息直接进行调制.具体而言,就是将水印信息每位重复 P 次, P 为 m 序列周期,然后直接与 m 序列相乘,实现水印信息的频谱扩展.

通过视觉掩模将扩频信息直接加入到原始图像的像素值中,为了增强水印的稳健性以及水印检测和恢复的可靠性,对调制扩频码添加信号增益 G ,在此取值为 3,在达到较好视觉效果的情况下保证了一定的稳健性,见图 2.水印嵌入过程可以简单表示为

$$I' = I + MW, \quad (4)$$

其中 I 是原始图像, W 是水印信息, M 是视觉掩模, I' 是水印图像.



水印标记, BCH 编码, m 序列扩频码, 调制, 扩频, 水印图像, 视觉掩模, 原始图像.

Fig. 2 Watermark embedding process

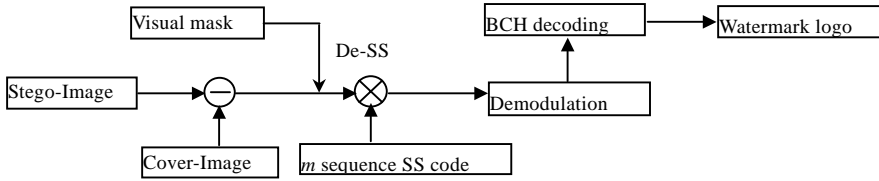
图 2 水印嵌入过程

1.5 水印的检测与恢复

水印的检测需要同样的 m 序列和原始图像的视觉掩模.常见的空间域水印检测算法包括计算扩频序列与水印图像的互相关性^[7],再通过阈值判定得出水印信息,还有先对水印图像进行图像复原滤波,求得复原图像与水印图像的差值,再与扩频序列进行相关检测^[8].这样的好处在于不需要原始图像,可以实现盲检测,缺点就是会带来较大的误码率,尤其是在水印图像遭受各种信号畸变和干扰的情况下.

为了提高系统的稳健性,我们利用原始图像进行水印检测与恢复.假设水印图像已经遭受过噪声干扰,先求出原始图像与水印图像的差值,再由式(5)计算 m 序列(M_k)和差值图像(I_k)的相关性,解扩出调制水印信息,然后再解调出嵌入的水印信息,通过 BCH 译码恢复初始水印标记,如图 3 所示.

$$R(\tau) = \sum_{k=1}^p I_k M_{k+\tau} \quad (5)$$



视觉掩模, 解扩, BCH译码, 水印标记, 水印图像, 解调, 原始图像, *m* 序列扩频码.

Fig. 3 Watermark recovering process

图 3 水印恢复过程

2 实验

采用 512×512 的 256 阶灰度图 Lena 作为原始图像,如图 4(a)所示.作为比较,图 4(b)给出了未加视觉掩模的水印图像,PSNR = + 38.60,图 4(c)是其与原图的差值图像.采用视觉掩模生成的水印图像为图 4(d),PSNR = + 41.73,其与原始图像的差值图像如图 4(e)所示.视觉掩模为图 4(f),使用的水印标记为图 4(g).

为了检验水印方案的稳健性,我们先对水印图像施加二进制均匀随机噪声,幅度为 ± 12 ,是水印信号增益的 4 倍,再进行水印的检测与恢复,结果如图 5 所示.其中,图 5(a)为添加噪声的水印图像,图 5(b)为其与原始图像的像差,图 5(c)为恢复的水印标记,几乎没有什么失真.再进一步,运用 3×3 窗口对水印图像进行中值滤波,得到图 6(a),恢复水印为图 6(b),可见中值滤波对于水印的干扰比较均匀随机噪声要大.

需要指出的是,在实际应用中,对水印图像的干扰和信号畸变应该在很大程度上影响水印图像的保真度.从这一点来说,我们的水印方案是具有较强的稳健性的.

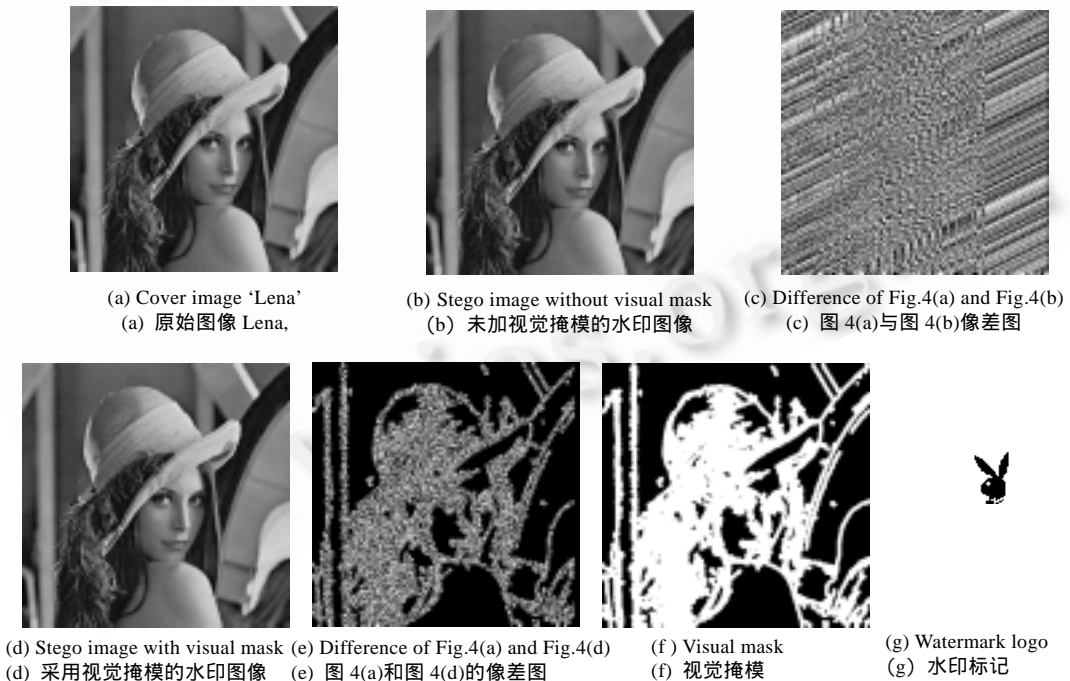


Fig. 4 Experiment images of watermark embedding

图 4 水印嵌入实验图像

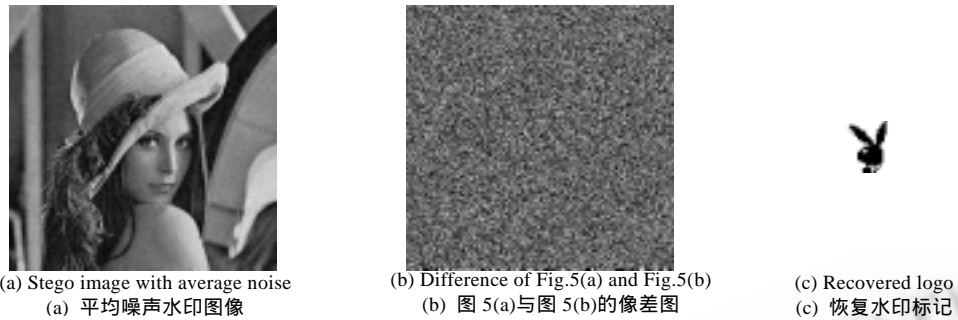


Fig. 5 Watermark recovering under average noise

图 5 添加均匀随机噪声的水印恢复



Fig. 6 Watermark recovering after median filtering

图 6 经过中值滤波的水印恢复

3 结 语

本文提出了一种基于直接序列扩频码的图像空间域水印方案.采用了扩频技术以及纠错编码技术,结合视觉掩模嵌入水印信息,在提高水印系统的稳健性同时,获得比一般的扩频水印方案更好的主观视觉效果.

当然,这个方案仍有改进之处.比如视觉掩模图像的生成,要能够更好地反应出原始图像的纹理、明暗等特征区域,同时要保证有一定的水印信息容量.本方案由于采用边缘检测生成的视觉掩模,因此嵌入的水印对于能够去除图像高频成分的滤波,如 JPEG(joint photographic experts group)压缩的稳健性不是很好,需要在今后的研究中进一步改进.

对于水印信息的检测和恢复,虽然本文的方法可以提高系统的稳健性,但毕竟需要原始图像的参与,这就可能带来实际应用上的不便.可以考虑使用图像复原以及直接互相关和阈值判定等,以简化检测方法.

References:

- [1] Shen, Yun-shan. Spread Spectrum Technology. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 1995 (in Chinese).
- [2] Gui, Shao-sheng. Technology and Application of Error Correct Coding. Shanghai: Publishing House of Shanghai Jiaotong University, 1988 (in Chinese).
- [3] McWilliams, F.J., Sloane, N.J.A. Pseudo-Random sequences and arrays. Proceedings of the IEEE, 1976,64(12):1715~1729.
- [4] Bartolini, F., Barni, M., Cappellini, V., *et al.* Mask building for perceptually hiding frequency embedded watermarks. In: Zhang, Y. Q., ed. Proceedings of the International Conference on Image Processing, Vol1. Chicago, 1998. 450~454.
- [5] Canny, J.F. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,8(6):678~698.
- [6] Su, K.J., Hartung, F., Girod, B. Digital watermarking of text, image, and video documents. Computer & Graphics, 1998,22(6): 687~695.

- [7] Tirkel, A.Z., Osborne, C.F. Image watermarking—a spread spectrum application. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Mainz Germany, 1996. 785~789.
- [8] Charles, G., Boncelet, J. Hiding information in images. In: Ramchandran, K., ed. Proceedings of the International Conference on Image Processing, Vol2. Chicago, 1998. 396~398.

附中文参考文献:

- [1] 沈允善.扩谱技术.北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 归绍升.纠错编码技术和应用.上海:上海交通大学出版社,1988.

Spatial Domain Image Watermarking Technology Based on Direct Sequence Spread Spectrum Codes*

ZHOU Li-jun, ZHOU Yuan-hua

(Institute of Image Communication and Information Processing, Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200030, China)

E-mail: ljzhou@lucent.com; yhzhou@mail.sjtu.edu.cn

<http://www.sjtu.edu.cn>

Abstract: A kind of spatial domain image watermarking scheme based on direct sequence spread spectrum (DSSS) codes is proposed in this paper. On the basis of establishing the communication model of digital image watermarking, the authors generate a visual mask from the cover image to keep the fidelity of the image, and then embed the spread spectrum modulated watermark into the corresponding spatial domain of the digital image. At the same time, the error correction coding technique is used to improve the anti-jamming capability of the watermark. The detection is realized by computing the correlation between the difference image and the original spread spectrum codes. Experimental results show that the scheme improves the robustness and invisibility of the image watermark, while has preferable subjective effects.

Key words: digital image watermarking; direct sequence spread spectrum; visual mask; error correction coding

* Received May 20, 2000; accepted August 7, 2000