

用于图像认证的可恢复半脆弱数字水印

王祖喜 赵湘媛

(华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要 为了提高图像认证的可靠性, 提出了一种用于图像内容认证的可恢复半脆弱数字水印方案, 该方案不仅能鉴别数字图像内容的真实性, 还可近似恢复图像中被篡改的区域。该方案基于半色调处理技术, 首先将图像半色调处理后生成的二值水印图像经JBIG2压缩后作为嵌入水印, 然后经量化索引调制嵌入小波域。用该方案嵌入水印后的图像, 在检测时, 不但可以定位图像中被篡改的区域, 还可以对提取的恢复水印进行解压, 并可通过逆半色调处理来重建原图像, 用它的对应部分替换被篡改区域来实现对被篡改图像的篡改恢复。此外, 由于该算法采用密钥来控制水印的嵌入位置, 从而保证了水印的安全性; 仿真实验是采用一般性操作和篡改操作相结合的方法, 实验结果表明, 该算法在保护数字图像内容真实性方面是可行的。

关键词 图像认证 量化索引调制 半色调技术 篡改恢复

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)07-1258-07

Recoverable Semi-fragile Watermark for Image Authentication

WANG Zu-xi, ZHAO Xiang-yuan

(Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology,
Key Laboratory of Image Processing and Intelligent Control, Ministry of Education, Wuhan 430074)

Abstract A recoverable semi-fragile watermarking algorithm for image content authentication is proposed. The algorithm employs a compressed halftoned binary image as watermark and embeds it in the wavelet domain through quantization index modulation. It can not only detect the tampered area, but also recover it through decompressing and inverse halftoning the watermark image. Beside, a secret key is used to select the embedded watermark bits and their embedded positions to increase the security of watermarking. Experimental results show that this semi-fragile watermarking algorithm is effective and practical for content authentication.

Keywords image authentication, quantization index modulation, halftone, tamper recovery

1 引言

图像认证技术主要分为精确认证和模糊认证^[1]两类。前者不允许对图像内容进行任何操作, 一般采用脆弱水印(fragile watermark)技术, 这类水印对嵌入水印图像的任何修改都非常敏感, 即使有1bit的改变, 图像也不能通过认证; 而模糊认证则允许不改变图像感知内容的处理, 通常使用半脆弱水印(semi-

fragile watermark)来进行认证, 它对不改变图像内容意义的操作(如有损压缩和增强等)具有鲁棒性, 而对剪切、替换物体等恶意篡改图像内容含义的操作则具有脆弱性。实际应用中, 由于图像格式众多, 通常以压缩方式存储或传输, 而用户所要认证的通常是原始图像经有损压缩或其他保持图像内容的操作处理后的图像, 因此, 模糊认证在现实生活中更为实用。

目前已经提出了许多用于图像模糊认证的半脆弱水印技术^[2-4]。Lin和Chang推导出JPEG压缩前

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2001ABB036, 2007ABA015)

收稿日期: 2006-03-07; 改回日期: 2006-09-16

第一作者简介: 王祖喜(1964~), 男, 华中科技大学副教授, 2000年获华中科技大学博士学位。主要从事网络信息安全、模式识别与智能系统、数字水印、数字版权保护等方面的研究。E-mail: zuxiw@mail:hust.edu.cn

后 DCT 系数的两个不变特性,据此设计出的算法允许一定范围内 JPEG 压缩^[2],其虽可对其他恶意攻击做出反应,但篡改定位能力不强。Lu 和 Liao 以嵌入点的视觉可觉察门限(JND)为步长,对小波系数进行量化调制^[3],其利用人眼视觉掩盖模型嵌入水印,虽然生成的嵌入水印后的图像具有更好的主观视觉质量,但必须存储映射表和原始水印信息,且实现较为复杂。Chen 和 Wornell 提出了量化索引调制水印(QIM)^[4]算法,它是先根据量化函数对图像的小波系数进行量化,然后通过调整量化步长来控制水印的鲁棒性,最后利用攻击估测函数将图像遭受的恶意篡改与保持图像内容的操作区分开来,并证明了这类水印在加性高斯白噪声信道中是容量最优的。由于这些算法大都只能判定图像是否被篡改和只能检测出被篡改的区域,因而不能恢复被改动的数据。

本文提出的半脆弱水印算法是将原图像的半色调图像压缩后作为恢复水印,并经量化调制嵌入小波系数。检测时,若提取的水印值与嵌入的水印值不符,则判定该点被篡改。恢复水印解压后,再经逆半色调处理即可得到原图像的低分辨率版本,用它的对应部分替换被篡改区域,即可实现对被篡改图像的近似恢复。

2 图像半色调技术

众所周知,传真机、激光与喷墨打印机等图像输出设备均属二值设备,即仅具有两种输出状态:黑点或白点。由于它们不能直接绘制具有多种灰度级的图像,必须先对原始图像进行变换处理,因此这类变换处理技术被称为数字图像半色调技术。利用图像半色调技术可以把一幅高分辨率的图像转换为低分辨率的图像(例如将一幅 8 bit 的灰度图像转换为二值图像),但从一定距离看这幅半色调图像时,却与原图像有相似的视觉效果,并且通过逆半色调处理可重建原始连续色调图像。

2.1 半色调算法

有许多方法可以实现数字图像半色调化,其中 Bayer 的有序抖动^[5]与 Floyd-Steinberg 的误差扩散^[6]算法是使用最为广泛的两种技术。除此之外,还有 Knuth 提出的点扩散^[7]以及其他自适应与优化算法等^[8,9]。误差扩散法(error diffusion)的基本思想是将图像量化过程中产生的误差分配给周围像素点。该方法原理精巧简单,而且在效果上能较忠实地反映原

有图像的灰度层次过渡,优于大部分已有算法。

设原连续色调图像为 x , 图像中像素点 (m, n) 的灰度值用 $x_{m,n}$ 表示,且 $x_{m,n} \in [0, \beta]$, β 为灰度级最大值。用 b 表示半色调图像。一般的半色调算法是对连续色调图像 x 到半色调图像 b 的非线性变换 $Q(\cdot)$ 。误差扩散系统如图 1 所示:

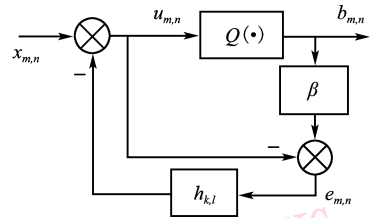


图 1 误差扩散系统

Fig. 1 Error diffusion system

误差扩散的输入输出关系如下:

$$u_{m,n} = x_{m,n} - \sum_{(k,l) \in S} h_{k,l} e_{m-k,n-l} \quad (1)$$

$$e_{m,n} = \beta b_{m,n} - u_{m,n} = \beta Q(u_{m,n}) - u_{m,n} \quad (2)$$

其中, $u_{m,n}$ 是状态变量, $h_{k,l}$ 是误差扩散核, S 是核的作用区域, $e_{m,n}$ 是量化误差。如果 $u_{m,n}$ 大于等于 $\beta/2$, 则输出的像素值 $b_{m,n}$ 为 1, 否则为 0, 即

$$b_{m,n} = Q(u_{m,n}) = \begin{cases} 1 & u_{m,n} \geq \frac{\beta}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

用基于 Floyd-Steinberg 核(如图 2 所示)的误差扩散法对原图像做半色调处理,其得到的二值水印图像如图 3 所示:

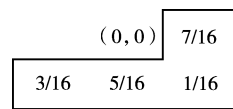


图 2 Floyd-steinberg 核

Fig. 2 Floyd-steinberg kernel



(a) 原图像

(b) 二值水印图像

图 3 原图像和半色调生成的二值水印图像

Fig. 3 Original image and halftoned binary watermark image

2.2 逆半色调算法

逆半色调是指由半色调图像重建原连续色调图像。一种简单的方法是使用低通滤波器,但低通滤波器同时也会因为将原连续色调图像的大量高频成分滤去而使得图像变得模糊。其他一些更精确的算法还有投影法(POCS)^[10]、最大后验概率估计-马尔可夫随机场法(MAP-MRF)^[11]、查找表法(LUT)^[12]等。

Au 等人提出了利用自适应滤波的逆半色调算法^[13],该算法综合使用了空间变化滤波器和空间不变滤波器,其对图像边缘区域和平滑区域都有很好的重建效果,且由于两个滤波器都是线性的,因此算法复杂度低,运算速度快。滤波器的系数 $a_{i,j}(k,l)$ 是像素值 $x(i+k,j+l)$ 和目标值 $\hat{x}(i,j)$ 之间差值的函数,即

$$a_{i,j}(k,l) = f(|x(i+k,j+l) - \hat{x}(i,j)|) \quad (3)$$

$$f(z) = \left(1 - \frac{z}{255}\right)^p \quad z = 0, \dots, 255 \quad (4)$$

p 是一常数,当 $p = 1$ 时, f 是一线性映射。通常可以选择不同的邻域进行逆半色调处理。在实验模拟中,本文使用了 3×3 的邻域。重建时,通过多次迭代可获得更好结果(如图 4 所示)。



图 4 逆半色调后重建的原图像

Fig. 4 Reconstructed Image by Inverse halftoning

3 水印嵌入和检测算法

3.1 量化水印方案

本文是采用 Chen 和 Wornell 提出的 DC-QIM (distortion-compensated quantization index modulation) 算法^[4]来嵌入水印。经证明,DC-QIM 算法在几类重要的概率模型(如加性高斯白噪声信道)下是容量最优的,且不受宿主信号干扰。与 Kundur 和 Hatzinakos 的量化算法^[14]相比,在同样的量化步长下,图像失真更小,鲁棒性更强。

水印的嵌入包括以下过程:(1)对原始图像进行 L 级的离散小波变换,这里用 $f_{k,l}(m,n)$ 表示第 l 尺度的细节子图像, $l = 1, 2, \dots, L$ 表示分解尺度, $k = h, v, d$ 分别表示水平、垂直和对角, (m,n) 为 l 尺度下的空间位置;(2)根据量化函数改变各分辨率下的小波系数以实现水印的嵌入;(3)对量化后的图像小波系数进行相应的 L 级离散小波逆变换,以生成隐藏水印的图像。

其中,QIM 量化函数如式(5)所示:

$$Q_{k,l}(m,n) = \begin{cases} \text{round}\left[\frac{f_{k,l}(m,n)}{\Delta_{k,l}}\right] \times \Delta_{k,l}(m,n), & \text{如果 } w_l(m,n) = 0 \\ \text{round}\left[\frac{f_{k,l}(m,n) + \frac{\Delta_{k,l}}{2}}{\Delta_{k,l}}\right] \times \Delta_{k,l} - \frac{\Delta_{k,l}}{2}, & \text{如果 } w_l(m,n) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

即如果 $w_l(m,n)$ 为 0,则 $Q_{k,l}(m,n)$ 落在 $\mu \times \Delta_{k,l}$; 如果 $w_l(m,n)$ 为 1,则 $Q_{k,l}(m,n)$ 落在 $\mu \times \Delta_{k,l} + \frac{\Delta_{k,l}}{2}$ 范围内。其中, $\mu = \text{round}\left[\frac{f_{k,l}(m,n)}{\Delta_{k,l}}\right]$; w_l 为要嵌入的水印, $w_l(m,n)$ 表示二值水印的 (m,n) 像素点的值,其将在 3.2 节中定义。

失真补偿是一种可改善 QIM 失真-鲁棒性比的量化后处理方法。其在量化值上加上量化误差的 $(1 - \alpha)$ 倍能移除部分失真。相应的量化调制如式(6)所示:

$$\tilde{f}_{k,l}(m,n) = Q_{k,l}(m,n) + (1 - \alpha)e_{\Delta_{k,l}}(f_{k,l}(m,n), w_l(m,n)) \quad (6)$$

式中第 1 项代表 QIM 嵌入,第 2 项代表失真补偿,其中, $e_{\Delta_{k,l}}(f_{k,l}(m,n), w_l(m,n)) = f_{k,l}(m,n) - Q_{k,l}(m,n)$ 。

α 的取值在 0 到 1 之间,尽管减小 α 的值会减小失真,但会因 α 值增大对解码器的干扰而使误检率升高,通常 α 取值大于 0.5。图像经小波变换后,由于能量主要集中在低频部分,所以本算法在低频部分做较大的量化,以保证半易损水印系统的鲁棒性,而在高频部分则做较小的量化,以保证易损性,即 $\Delta_{k,l} = 2^l \Delta$ (Δ 为一个小的正实数)。

在检测时,设待检数据为 $\hat{f}_{k,l}(m,n)$,根据 $\hat{f}_{k,l}(m,n)$ 与 $\mu \times \Delta_{k,l}$ 或 $\mu \times \Delta_{k,l} + \frac{\Delta_{k,l}}{2}$ 的距离恢复出

水印信息:若距 $\mu \times \Delta_{k,l}$ 较近,则为0;而距 $\mu \times \Delta_{k,l} + \frac{\Delta_{k,l}}{2}$ 较近,则为1,即

$$\hat{w}_l(m,n) = \text{mod} \left(\text{round} \left(\frac{\hat{f}_{k,l}(m,n)}{\frac{\Delta_{k,l}}{2}} \right), 2 \right) \quad (7)$$

提取水印与嵌入水印的差别可用来说明认证水印信息的变化,继而可指出水印图像的变化及被改动的位置。

3.2 水印的选取方法

为减小图像失真,仅在每一尺度的细节子图中嵌入水印,即根据用户指定的密钥从集合 $\{f_l^h(m,n), f_l^v(m,n), f_l^d(m,n)\}$ 中随机选取一个系数嵌入水印,这样,每一分解尺度的任一空间位置都被水印标示,并且在检测时能更好地评估原图像的变化。设原图像大小为 $P = M \times N$,而半色调之后得到的二值图像,其大小仍为 P ,其实际水印容量

$$C = \sum_{l=1}^L \frac{1}{4^l} \cdot P。$$

利用二值图像压缩标准 JBIG2^[15]对半色调二值图进行压缩来得到恢复水印 \tilde{W} ,通常其大小 $\tilde{P} \leq C$ 。由密钥控制来产生 $(C - \tilde{P})$ bit 的伪随机序列 R ,再将其连接在 \tilde{W} 尾部,即得到 $\tilde{W} + R$ 。

通过对 $\tilde{W} + R$ 置乱、分块,首先构成大小分别为 $\left(\frac{1}{2}\right)^l M \times \left(\frac{1}{2}\right)^l N$ 的3个待嵌入水印 $w_l, l = 1, 2, 3$,用来作为定位水印,并将其分别嵌入到原始图像小波变换后第 l 尺度的细节子图中。由于水印嵌入位置和实际嵌入的水印均由密钥决定,因此算法的安全性可得到保障。

如果 $\tilde{P} > C$,则直接先将 \tilde{W} 置乱、分块,然后类似上文选取3块分别嵌入到对应的细节子图中,剩下的 $(\tilde{P} - C)$ bit 在3层子图中任意嵌入。

3.3 篡改评估与定位

常见的篡改评估方式是使用篡改评估函数 (tamper assessment function, TAF)^[14],其定义为

$$TAF(w, \hat{w}) = \frac{1}{N_w} \sum_{i=0}^{N_w} w(i) \oplus \hat{w}(i) \quad (8)$$

式中, w 为嵌入的水印, \hat{w} 为提取出来的水印, N_w 为水印比特数, $w(i)$ 和 $\hat{w}(i)$ 分别表示 w 和 \hat{w} 的第 i 个比特值, \oplus 是异或操作。 $TAF(w, \hat{w})$ 值在0

到1之间。选定阈值 τ ,若 $TAF(w, \hat{w}) \geq \tau$,则判定图像被篡改,反之,则判定图像的失真是一些合理的图像处理结果。这种方法的弊端在于只能根据 TAF 值与阈值的关系做出接受或拒绝的判断,无法判别造成失真的原因。当图像未经一般图像处理,其局部某一小物体被剪切替换时, TAF 值仍可能因小于阈值而造成误判。因此,除 TAF 值外,本文还使用了更为直观的嵌入水印与提取水印的二值差别图来衡量图像的失真程度,并定位篡改区域。

嵌入水印与提取水印的二值差别图定义如下:

$$D_l(m,n) = w_l(m,n) \oplus \hat{w}_l(m,n) \quad (9)$$

$$l = 1, 2, \dots, L$$

它指出了收到图像的每一个子图内发生失真的位置。由于偶然攻击对小波系数的影响近似服从方差较小的高斯分布,因此产生的水印检测错误点在差别图上大部分都是孤立的,即聚集在一块的概率较小。而对于恶意攻击,由于水印图像被剪切、替换、涂改等操作篡改的区域与嵌入水印序列之间没有对应的量化关系,因此经量化运算后, $\hat{w}_l(m,n)$ 的值取0和1的概率都是1/2,水印检测错误点在这些区域满足(0-1)分布,比较集中。这样,除了可以从直观上找出恶意篡改的区域外,还可以用中值滤波 (medianfilter) 去除差别图上的孤立点 (如式(10)所示)。

$$T_l(m,n) = \text{medianfilter}(D_l(m,n)) \quad (10)$$

对 中 值 滤 波 后 的 各 层 二 值 差 别 图 $T_l(m,n)$ 做 L 级离散小波逆运算,并将得到的篡改定位图定义为 $T(m,n)$,以便为篡改恢复提供依据。

3.4 篡改恢复

先按式(11)对篡改定位图做膨胀运算 (dilate) 使稠密点连通,用来得到用于恢复篡改的 $\hat{T}(m,n)$ 。

$$\hat{T}(m,n) = \text{dilate}(T(m,n)) \quad (11)$$

然后提取3个定位水印,并通过合并分块、反置乱来得到 $\tilde{W} + R$,再根据密钥去除伪随机序列 R 来得到恢复水印 \tilde{W} ,JBIG2 解压缩后,经逆半色调变换即可得到原始图像的近似图像 $\tilde{I}(m,n)$,用来对篡改后的图像做近似恢复。

设接收到的篡改图像为 $I(m,n)$,可根据 $\hat{T}(m,n)$ 的取值来得到恢复图像 $\hat{I}(m,n)$ 。

当 $\hat{T}(m, n)$ 的值为 1 时,则表示图像在像素点 (m, n) 处发生了篡改,可用 $\tilde{T}(m, n)$ 替代 $I(m, n)$ 来恢复篡改;否则认为图像在像素点 (m, n) 处未发生篡改,不做替代变换(如式(12)所示):

$$\hat{I}(m, n) = \begin{cases} I(m, n) & \hat{T}(m, n) = 0 \\ \tilde{T}(m, n) & \hat{T}(m, n) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

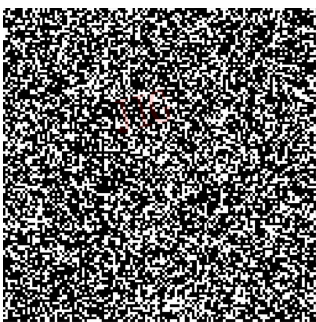
由于水印在嵌入之前已被置乱,使图像被篡改区域相应的恢复数据已扩散到其他未被篡改区域而被很好地保存下来,因此保证了较好的恢复效果。

4 实验结果

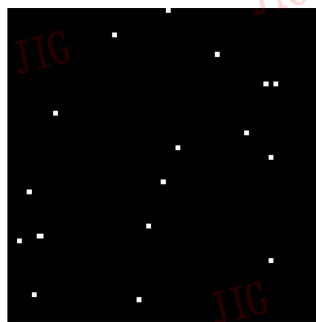
为验证本算法的认证效果,使用 256×256 大小的 peppers 标准测试图像(图 5(a))进行了嵌入水印实验。图 5(b)是嵌入水印后的图像,实验使用的图像分解尺度为 $L = 3$,量化参数 $\Delta_1 = 6, \Delta_2 = 12, \Delta_3 = 24, \alpha = 0.9$,嵌入水印后的图像与原图的峰值信噪比是 $PSNR_{peppers} = 44.629$ dB。可见,使用本文的半易损水印方法,嵌入水印后的图像的峰值信噪比是比较高的。对图 5(b)直接进行水印检测,即可得到 3 个尺度子图的 TAF 值,它们分别为: $TAF_1 = TAF_2 = TAF_3 = 0$,与此相反,若用不含水印的图像进行检测,则得到 $TAF_1 \approx TAF_2 \approx TAF_3 \approx 0.5$ 。

4.1 JPEG 有损压缩

表 1 是图 5(b)含水印的图像经过 JPEG 有损压缩后得到的水印检测结果。



(a) 第1层水印二值差别图



(b) 第2层水印二值差别图



(c) 第3层水印二值差别图

图 6 JPEG 质量因子为 80 时各层的水印二值差别图

Fig. 6 Binary differential watermark images of each levels

4.2 图像篡改检测、定位与恢复

该实验是先对测试图像嵌入水印后,再做质量因子为 80% 的 JPEG 压缩,然后改变图像内容(如图



(a) Peppers图像



(b) 含水印的图像

图 5 标准测试图像及其含水印的图像

Fig. 5 Standard test image and the image with watermark

表 1 JPEG 有损压缩后的检测结果

Tab. 1 Detecting results of loss JPEG compressed watermarks

JPEG 质量因子	PSNR (dB)	TAF_1	TAF_2	TAF_3
90	42.509 8	0.205 0	0	0
80	41.122 8	0.377 2	0.004 2	0
60	38.255 7	0.490 5	0.155 3	0
30	34.903 9	0.504 2	0.450 7	0.085 0

从表 1 可以看出, JPEG 压缩对高频子图中的易损水印有破坏,并且随着质量因子减小,图像压缩比增大,其对低频子图中水印的破坏也逐渐增多,但仍远小于 0.5。当水印图像的质量因子为 30% 时,由低频子图提取到的 TAF 值仍表明图像中存在水印。此外,如图 6 所示,根据不同子图中水印检测到的错误点的分布,即可判定图像未受到恶意篡改。

7(a)所示),图像右上方添加了两个物体,此时的 PSNR 值为 21.2815 dB。由图 7(a)检测水印得到的二值差别图分别如图 7(b)~(d)所示。图像篡

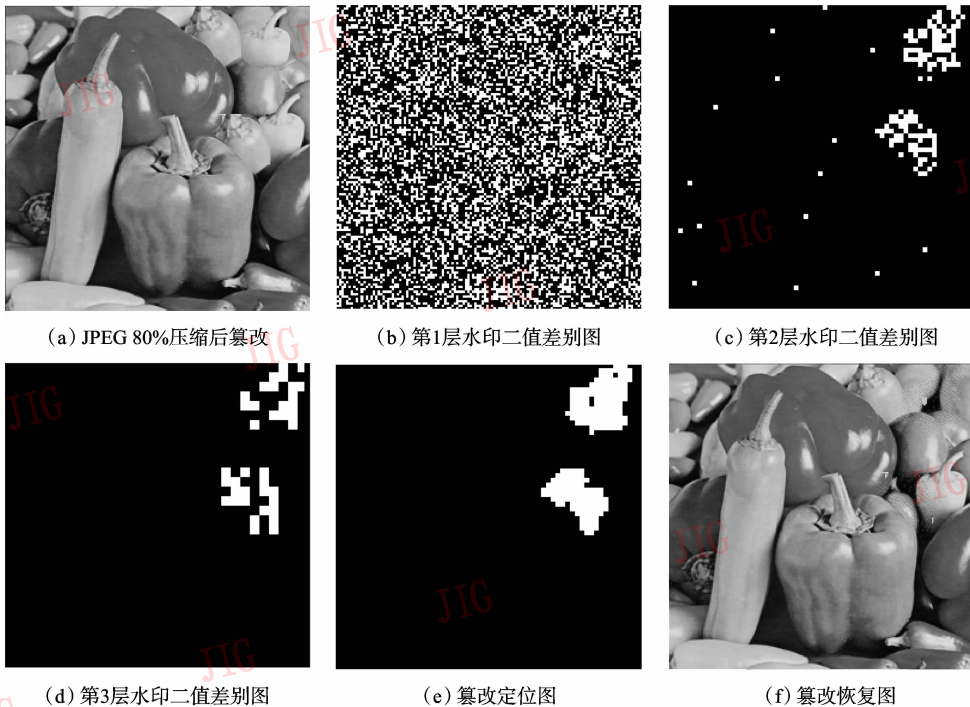


图7 篡改检测、定位与恢复实验结果

Fig. 7 Results of tamper detection, position and recovery

改检测恢复时,先依式(10)做中值滤波,然后做 L 级离散小波逆运算,得到的篡改定位图如图7(e)所示,最后以篡改定位图为模板,选取 $\tilde{I}(m,n)$ 中的相应点替换图7(a)中被篡改的点,得到的篡改恢复图如图7(f)所示,PSNR值为33.6848 dB。与未恢复图相比,不但PSNR值显著提高,且基本重现了原图的相应区域。

5 结论

本文提出的一个在小波域内基于量化索引调制的半易损水印方案,不仅能鉴别数字图像内容真实性,还可近似恢复图像中被篡改区域。该方法具有以下几个特点:(1)该方法是将原图像的半色调图像压缩后作为恢复水印,由于水印是原图像的低分辨率版本,携带了原图像的信息,因此在认证时不需原图,且在发生篡改时,可根据水印恢复被篡改的区域,该方法与一般基于特征的图像认证方法都属于内容认证的方法,其不仅可有效验证恶意篡改,而且可容忍一定的压缩失真以及一般的不影响图像内容的操作和一定的噪声影响,另外还解决了一般基于特征的认证方法中,水印与图像之间非一一映射的问题^[16,17],不但可抵抗冒充攻击,并提供了篡改

恢复的能力;(2)基于量化索引的调制方法在小波域嵌入水印,可根据不同应用的需要调整量化步长,以便使算法在鲁棒性和脆弱性之间获得了较好的平衡;(3)在认证时,除使用传统的TAF值外,还使用了更为直观的二值差别图来给出篡改定位图,从而为篡改恢复提供了依据。仿真试验是采用一般性操作和篡改操作相结合,试验结果表明,本文方法对不改变图像内容意义的操作具有较好的鲁棒性,而且在对水印图像进行一般性处理后,仍能检测到篡改的发生,并能定位篡改和近似重建被篡改区域。

参考文献 (References)

- 1 Zhu B B, Swanson M D, Tewfik A H. When seeing isn't believing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(2): 40~49.
- 2 Lin C Y, Chang S F. Semi-fragile watermarking for authentication JPEG visual content [A]. In: Proceedings of SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents II [C], San Jose, CA, USA, 2000, 3971: 140~151.
- 3 Lu C S, Liao H Y M. Multipurpose watermarking for image authentication and protection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1579~1592.
- 4 Chen B, Wornell G W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(5): 1423~1433.

- 5 Bayer B E. An optimum method for two level rendition of continuous tone pictures[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications [C], New York, NY, USA, 1973, **1**: 2611 ~ 2615.
- 6 Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray scale [J]. Proceedings of the Society for Information Displays, 1976, **17**(2): 75 ~ 77.
- 7 Knuth D E. Digital halftones by dot diffusion[J]. ACM Transactions on Graphics, 1987, **6**(4):245 ~ 273.
- 8 Ulichney R A. Dithering with blue noise [J]. Proceedings of the IEEE, 1988, **76**(1): 56 ~ 79.
- 9 Wong P W. Adaptive error diffusion and its application in multiresolution rendering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, **5**(7):1184 ~ 1196.
- 10 Analoui M, Allebach J P. New results on reconstruction of continuous-tone from halftone [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C], San Francisco, CA, USA, 1992, **3**: 313 ~ 316.
- 11 Stevenson R L. Inverse halftoning via MAP estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, **6**(4): 574 ~ 583.
- 12 Mese M, Vaidyanathan P P. Look up table (LUT) method for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(10): 1566 ~ 1578.
- 13 Au O C, Fu M S, Wong P H W, *et al.* Hybrid inverse halftoning using adaptive filtering [A]. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C], Orlando, Florida, USA, 1999, **4**: 259 ~ 262.
- 14 Kundur D, Hatzinakos D. Digital watermarking for telltale tamper proofing and authentication [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, **87**(7):1167 ~ 1180.
- 15 Bian Wen-kui, He Pi-lian, Xu Meng-su. Bi-level image compression standard—JBIG2 [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, **38**(13):103 ~ 104. [边文奎,何丕廉,徐梦苏. 二值图象压缩标准——JBIG2 [J]. 计算机工程与应用,2002, **38**(13): 103 ~ 104.]
- 16 Cai Mao-guo, Wang Xiao-min. Blind watermarking based on wavelet transform and image edge [J]. Computer Engineering and Applications,2005, **41**(33): 54 ~ 59. [蔡茂国,王小民. 一种基于小波变换及图象边缘特征的盲水印算法 [J]. 计算机工程与应用,2005, **41**(33): 54 ~ 59.]
- 17 Wo Yan, Han Guo-qiang, Zhang Bo. A New feature-based image content authentication algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, **28**(1): 105 ~ 112. [沃焱,韩国强,张波. 一种新的基于特征的图象内容认证方法 [J]. 计算机学报,2005, **28**(1): 105 ~ 112.]