基于压缩感知的交互支持双水印算法

赵春晖,刘 巍
(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 针对一般水印算法功能单一,而双水印算法中两种水印互相干扰的问题,提出了一种交互支持双水印算法.首先将鲁棒水印嵌入图像中,然后从鲁棒水印的密钥中抽取出一部分形成观测矩阵,使用该观测矩阵对图像进行分块压缩感知(Compressive Sensing,CS),观测值即为半脆弱水印,将半脆弱水印作为零水印注册保存.零水印的使用减少了双水印对原始图像视觉效果的影响,可以有效避免两种水印之间的干扰.压缩感知理论的引入实现了两种水印之间的交互支持,一方面,鲁棒水印为半脆弱水印的生成提供观测矩阵及保密支持,另一方面半脆弱水印可以增强鲁棒水印的性能并验证其密钥的真实性.

关键词: 数字水印;压缩感知;双水印;零水印;奇异值分解
中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)04-0681-07
电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.04.010

Mutual Support Dual Watermark Algorithm Based on Compressive Sensing

ZHAO Chun-hui, LIU Wei
(*College of Information and communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang* 150001, *China*)

Abstract: Watermarking algorithms in general only have single function, and dual watermark algorithms have interference problems between the two watermarks. To address these issues, this paper proposes a mutual support dual watermark algorithm. Firstly embed robust watermark in the image, and then divided the image into blocks, extract measurement matrixes from the key of the robust watermark and observe each image block using these matrixes in accordance with the compressive sensing (CS) theory, the measurements are the semi-fragile watermark which will be registered as a zero-watermarking. The use of zero-watermarking can reduce the impact of visual effect on the original image by dual watermark, and effectively avoid the interference problems. The introduction of CS theory realizes the interaction between the two watermarks. On the one hand, the robust watermark provide measurement matrixes and secrecy support for the semi-fragile watermark, on the other hand, the semi-fragile watermark can Enhance the robust performance of the robust watermark and verify the authenticity of its key.

Key words: digital watermark; compressive sensing (CS); dual watermark; zero-watermarking; singular value decomposition (SVD)

1 引言

数字水印作为一种有效解决图像版权问题的技术受到了广泛的关注.现有数字作品往往既需要保护版权信息又需要保证内容的真实性和完整性,但是一般水印算法在功能上大多是单一的,无法满足这一要求.双水印[1]技术通过向宿主图像中嵌入两种不同用途的水印实现对于多重功能的需求,鲁棒水印和半脆弱水印的组合能够涵盖数字水印的主要功能,可以满足绝大多数应用的需要.文献[2]基于奇异值分解(Singular Value Decomposition,SVD)理论设计了一种经典的鲁棒水印算法,但该算法具有严重的安全隐患[3].另外两个相互独立工作的水印往往会导致双水印算法具有如下缺陷:(1)同时嵌入两种水印对图像视觉效果影响大;(2)两种水印在嵌入和提取过程中相互干扰,导致各自性能下降.

针对上述问题,本文提出了一种交互支持双水印算法.通过压缩感知[4,5]理论实现了双水印之间的沟通,达到安全性上相互验证,功能上相互加强的目的.该算法首先利用文献[2]算法将鲁棒水印嵌入图像中实现版权保护,然后从鲁棒水印的密钥中抽取出一部分形成观测矩阵,使用该观测矩阵对含有水印的图像进行分块压缩感知,观测值即为半脆弱水印,将半脆弱水印作为零

收稿日期:2011-03-02;修回日期:2012-02-19
基金项目:国家自然科学基金(No.61077079);高等学校博士学科点专项基金(No.20102304110013)

水印[6]注册保存,实现对篡改的定位和恢复.零水印的使用减少了双水印对原始图像视觉效果的影响,可以有效避免两种水印之间的干扰.

2 基于奇异值分解的鲁棒水印

2.1 奇异值分解

数值分析中的奇异值分解(SVD)是一种将矩阵对角化的数值算法.从线性代数的角度出发,我们可以将一幅灰度图像看成一个非负矩阵.若一幅图像用 $\boldsymbol{A}$ 表示定义为 $\boldsymbol{A}\in\boldsymbol{R}^{N\times N}$(为方便起见,以后均只对方阵进行讨论),其中 $\boldsymbol{R}$ 表示实数域.则 $\boldsymbol{A}$ 的奇异值分解定义如下:

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{USV}^{\mathrm{T}}=\sum_{i=1}^{r}\sigma_i u_i v_i^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{U}\in\boldsymbol{R}^{N\times N}$和 $\boldsymbol{V}\in\boldsymbol{R}^{N\times N}$均为正交(或酉)矩阵,上标 T 表示矩阵转置;$\boldsymbol{S}\in\boldsymbol{R}^{N\times N}$为对角阵,对角线元素 $\sigma_1\geqslant\sigma_2\geqslant\cdots\geqslant\sigma_r>0$ 为矩阵的奇异值;$r=rank(\boldsymbol{A})$是矩阵的秩.

2.2 鲁棒水印的嵌入和提取

采用文献[2]中的经典方法实现鲁棒水印的嵌入和提取.假设原始载体图像为 $\boldsymbol{A}$,大小为 $N=I_r\times I_c$,水印为 $\boldsymbol{W}$,其尺寸不限但不应超过原始图像.鲁棒水印的嵌入过程为:

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{USV}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{S}+\alpha\boldsymbol{W}=\boldsymbol{U}_w\boldsymbol{S}_w\boldsymbol{V}_w^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{A}_w=\boldsymbol{US}_w\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

其中 α 为嵌入因子,通过改变 α 的大小来控制嵌入水印的强度并以此调节水印的嵌入对图像视觉效果的影响.矩阵 $\boldsymbol{U}_w$、$\boldsymbol{V}_w$ 以及 $\boldsymbol{S}$ 将会被作为密钥保存.

假设 $\boldsymbol{A}_w$ 在传播过程中经过一系列恶意及非恶意攻击后成为待检测图像 $\boldsymbol{A}_w'$.鲁棒水印的提取过程为:

$$\boldsymbol{A}_w'=\boldsymbol{U}'\boldsymbol{S}_w'\boldsymbol{V}'^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{U}_w\boldsymbol{S}_w'\boldsymbol{V}_w^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{W}'=(\boldsymbol{D}-\boldsymbol{S})/\alpha \tag{7}$$

3 基于压缩感知的半脆弱水印

3.1 压缩感知

考虑一个实值一维离散信号 $\boldsymbol{f}\in\boldsymbol{R}^N$,可以用一组正交基 $\boldsymbol{\Psi}$ 表示为:

$$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{\Psi x} \tag{8}$$

其中 $\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{R}^N$ 是正交变换系数向量.如果 $\sup(\boldsymbol{x}):=\{i:x_i\neq0\}$,那么当 $\sup(\boldsymbol{x})\leqslant\boldsymbol{S}$ 时称信号 $\boldsymbol{f}$ 为 $\boldsymbol{S}$——稀疏信号.在不进行变换的情况下直接通过一个与 $\boldsymbol{\Psi}$ 不相关的 $M\times N(M\ll N)$矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 获取信号 $\boldsymbol{f}$ 的观测值

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{\Phi f} \tag{9}$$

根据式(8),式(9)等价为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{\Phi f}=\boldsymbol{\Phi\Psi x}=\boldsymbol{\Theta x} \tag{10}$$

我们称 $M\times N$ 矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 为观测矩阵,$N\times N$ 矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 为稀疏分解矩阵.压缩感知矩阵 $\boldsymbol{\Theta}=\boldsymbol{\Phi\Psi}$ 是一个 $M\times N$ 矩阵.可以证明[7]解最小化 l_1 范数的优化方程

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\min\|\boldsymbol{x}'\|_1\quad\text{满足 }\boldsymbol{\Theta x}'=\boldsymbol{y} \tag{11}$$

可以准确恢复 $\boldsymbol{S}$——稀疏信号.当 $\boldsymbol{\Theta}$ 满足受限等距特性(Restricted Isometry Property,RIP)[8]时可以保证长度为 N 的 $\boldsymbol{x}$ 可以由 $M\geqslant O(S\log N)$个观测值,通过式(11)精确恢复出来.

3.2 半脆弱水印的生成

首先,含有鲁棒水印的图像 $\boldsymbol{A}_w$ 被分成大小为 $B\times B$ 的小块,若要构造数据量为 M 的水印,可以通过压缩感知对每个图像子块各取 $m=\lfloor MB^2/N\rfloor$个测量值.将鲁棒水印的密钥 $\boldsymbol{U}_w$ 和 $\boldsymbol{V}_w$ 合并为一个大小为 $N\times2N$ 的母观测矩阵 $\boldsymbol{Q}=[\boldsymbol{U}_w\boldsymbol{V}_w]$,按照某种规则从 $\boldsymbol{Q}$ 中依次抽取 m 行,$\boldsymbol{B}^2$ 列子矩阵作为每个图像块的观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_i$.

用 $\boldsymbol{Y}_i(i=1,2,\cdots,S)$表示第 i 个图像块的测量值,再将所有图像子块的测量值组合到一起生成最终的水印 $\boldsymbol{Y}_{wm}$,如式(12).

$$\boldsymbol{Y}_{wm}=[\boldsymbol{Y}_1\boldsymbol{Y}_2\cdots\boldsymbol{Y}_S]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

3.3 半脆弱水印的检测

在需要认证图像内容的真实性时,首先按照水印生成步骤取得待测图像的水印,然后将其与知识产权(Intelletnal Property Rights,IPR)注册水印比较,确定图像内容的真实性.如果将待测图像中检测出的水印表示为

$$\boldsymbol{Y}_{wm}'^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{Y}_1'^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{Y}_2'^{\mathrm{T}}\quad\cdots\quad\boldsymbol{Y}_S'^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

其中 $\boldsymbol{Y}_i'(i=1,2,\cdots,S)$表示待测图像中第 i 个图像子块的测量值

$$\boldsymbol{Y}_i'^{\mathrm{T}}=[y_{i1}'^{\mathrm{T}}y_{i2}'^{\mathrm{T}}\cdots y_{im}'^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

则可以采用欧氏距离的平方衡量 $\boldsymbol{Y}_{wm}'$与 $\boldsymbol{Y}_{wm}$的偏差

$$D_i=\sum_{k=1}^{m}(y_{ik}'-y_{ik})^2 \tag{15}$$

设定一个阈值 Th,当 $D_i>Th$ 时认为待测图像中第 i 块被恶意篡改,反之认为第 i 块内容真实.

本文在选择阈值时遵循下面准则.考虑 Th 应该由两部分组成

$$Th=t_1+\beta\cdot t_2 \tag{16}$$

其中 t_1 表征合法操作强度,t_2 表征非法篡改可以引起的最小扰动,β 表示一个与 t_1 有关的强度系数.本文中采用相似度量中的最小值作为 t_1,选择一个常数 C_2 作为 t_2.选择 β 时遵循这样的原则:当 t_1 为 0 时 $\beta=1$,β 随 t_1 增加而增加,则有

$$t_1 = \min_{D_i}(D) \tag{17}$$

$$t_2 = C_2 \tag{18}$$

$$\beta = \log\left(\frac{t_1 + 1}{C_1}\right) + 1 \tag{19}$$

其中 $C_1 = C_2 = 5 \times 10^4$ 为经验常数.

3.4 篡改恢复

为了实现精确恢复的目的,修正式(11)为 TV 最小化方法.令 $\| \boldsymbol{I} \|_{TV}$ 表示二维图像 I 的全变差,若图像的每一个像素为 $I(t_1, t_2)$,$0 \leqslant t_1, t_2 \leqslant N-1$,则

$$\| \boldsymbol{I} \|_{TV} = \sum_{t_1, t_2} \sqrt{\left| D_1 I(t_1, t_2) \right|^2 + \left| D_2 I(t_1, t_2) \right|^2} \tag{20}$$

其中 D 为有限差分,

$$D_1 I = I(t_1, t_2) - I(t_1 - 1, t_2) \tag{21}$$

$$D_2 I = I(t_1, t_2) - I(t_1, t_2 - 1) \tag{22}$$

为了从测量值 $\boldsymbol{y}$ 中重建图像 $\boldsymbol{I}$,式(11)可改写为

$$\boldsymbol{I}' = \min \| \boldsymbol{I} \|_{TV} \quad \text{满足 } \boldsymbol{\Phi f} = \boldsymbol{y} \tag{23}$$

通过式(23)即可精确重建原始图像.

4 双水印系统的交互支持机制

4.1 系统的总体机制

交互支持双水印系统中涉及到的载体图像均为灰度图像(彩色图像仅使用其亮度信息),鲁棒水印既可以是二值的黑白图像也可以是灰度图像.系统的总体流程如图 1 所示.

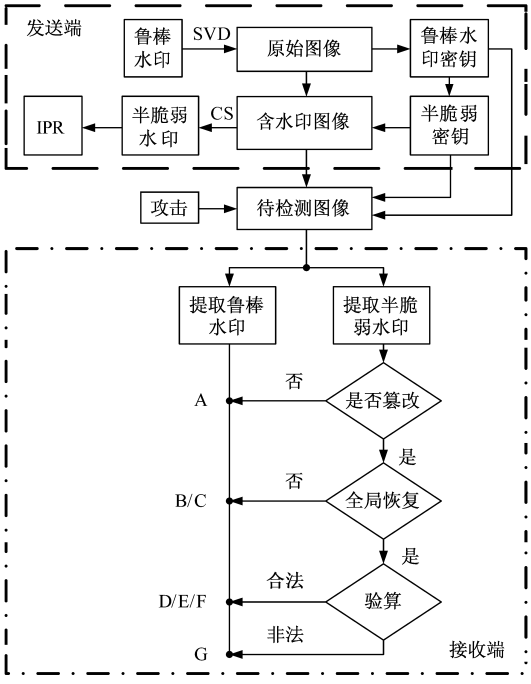


图1 系统流程图

(1)发送端:主要完成水印的生成和嵌入工作.首先采用文献[2]提出的经典算法向载体图像中嵌入鲁棒性水印,然后从鲁棒水印的密钥中抽一部分形成观测矩阵,使用该观测矩阵对图像进行分块压缩感知,观测值即为半脆弱水印,将半脆弱水印作为零水印注册保存.之后便可将处于双水印保护之下的原始图像送入信道传输了.

(2)接收端:主要完成水印的提取和鉴别工作.通过鲁棒水印密钥提取待测图像中的鲁棒水印,再按照与生成半脆弱水印相同的规则从鲁棒水印密钥中抽取出观测矩阵并对待测图像进行分块压缩感知,比对观测值和注册的零水印信息.综合鲁棒性水印和半脆弱性水印的提取效果,确定待测图像是否具有注册版权以及内容是否完整.

4.2 交互支持机制

区别于一般双水印系统中两种水印独立工作,本文设计的水印主要体现在两个方面:安全性方面的交互支持和功能性方面的交互支持.

(1)安全性方面:对同一幅图像来说,压缩感知的观测值与观测矩阵是一一对应的,不同的观测矩阵产生的观测值完全不同,如果不能提供正确的观测矩阵,即使预先知道采用的是压缩感知技术也根本无法从半脆弱水印中推测出原图像的任何信息.

(2)功能性方面:对于一幅没有版权的图像提取半脆弱水印时,检测结果往往同被大范围篡改或破坏的版权图像中提取半脆弱水印的效果类似.将鲁棒性水印与半脆弱水印相结合既可以达到功能上的互补,又实现了安全性方面相互印证.同时实现版权保护、内容认证、篡改定位与恢复等目的.

本文算法可以通过综合两种水印的提取效果对待测图像所经受的攻击类型及强度做出进一步的判断,实现更深层次的交互支持.按照图像所受攻击由弱到强,检测结果分为 A ~ G 七类,如表 1 所示

表 1 检测结果

结果	版权	篡改	范围	恢复	验算
A	清晰	无	——	——	——
B	清晰	弱	局部	局部	——
C	清晰	强	局部	局部	——
D	清晰	弱	全局	全局	——
E	降质	弱	全局	全局	——
F	——	强	全局	全局	——
G	——	强	全局	全局	非法

七类检测结果意义如下:

A:待测图像具有版权,只经历过合法操作,如 JPEG 压缩等,内容真实;

B:待测图像具有版权,但受到局部篡改,攻击目的

是伪造局部信息;

C:与 B 情况相同,但篡改强度更大,攻击目的是破坏局部信息;

D:待测图像具有版权,但受到全局篡改或经历过噪声、滤波等操作;

E:与 D 情况相同,但所受攻击强度更大;

F:与 D 情况相同,但图像的视觉信息已经遭到了严重损坏,极可能已经失去了应用价值;

G:待测图像不具有版权信息,属于对图像的非法版权声明.

为了叙述方便,简单设定若干参数来表征文中涉及到的程度描述.当鲁棒性水印的归一化相关系数(Normalized Correlation Coefficient,NC)在 0.9 以上时为清晰,否则视为降质.对于半脆弱水印来说,当检测出的篡改面积超过整幅图像面积的 20% 的时候认为图像遭到了全局篡改,否则为局部篡改.

5 实验结果及效果分析

本文实验中采用的鲁棒水印如图 2 所示,尺寸为 64×64 像素;载体图像(测试图像)如图 3 所示,尺寸统一设定为 256×256 像素;半脆弱水印中使用的分块大小为 16×16.

(1)水印嵌入对于载体图像的影响

采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio,PSNR)衡量水印嵌入对于载体图像的影响.在不同的嵌入强度下,本文算法对不同图像的实验结果如表 2 所示,为了兼顾性能与视觉效果,后续实验中将嵌入强度的值设定为 $\alpha = 40$.

表 2 检测结果

图像 / 强度	Lena	Cameraman	F16	Boat
$\alpha = 20$	57.2200	49.8831	49.5974	50.5198
$\alpha = 30$	45.0544	44.5681	44.5521	45.1648
$\alpha = 40$	41.5710	40.6950	40.5044	40.5776
$\alpha = 45$	40.0694	38.9305	38.7932	38.5024
$\alpha = 50$	38.6206	37.2377	37.2060	36.6226

(2)水印的交互支持性能实验

当含水印图像只经历过合法操作,如 JPEG 压缩时,待检测图像中提取出的鲁棒性水印效果清晰,半脆弱水印检测为无篡改,对应表 1 中检测结果 A 类.下面以最常见的 JPEG 压缩为例,本文算法对于不同的品质因数检测效果如表 3 所示,另外在图 4 和图 5 给出了品质因数 $Q = 15$ 时的具体效果图.

表 3 检测结果

图像 / 强度	$Q = 80$	$Q = 60$	$Q = 40$	$Q = 15$
PSNR	25.4110	25.1100	24.6154	23.8159
NC	0.9978	0.9968	0.9946	0.9882
半脆弱检测	无篡改	无篡改	无篡改	无篡改

图2 鲁棒水印

图3 测试图像

图4 Q=15时鲁棒水印的效果

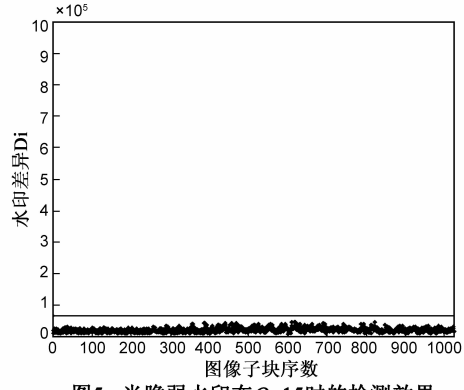


图5 半脆弱水印在Q=15时的检测效果

当攻击者企图伪造局部信息时,常常会对载体图像进行篡改局部,此类篡改攻击的强度通常较弱,对应表 1 中检测结果 B 类.在图像受到如图 6 所示篡改的情况下,载体图像 PSNR 值为 33.8245,鲁棒水印 NC 值为 0.9932,半脆弱水印检测结果为局部弱篡改.具体效果分别如图 7、图 8 所示,半脆弱水印检测值大于阈值的图像块对应被篡改图像块被定位出来,定位精度与分块尺寸相同为 16×16.局部篡改触发恢复操作,利用压缩感知的重建算法将检测出篡改的图像块恢复,并替换到待测图像相应的位置上即可完全恢复原始图像,具体效果如图 9.

在某些情况下,攻击者单纯为了破坏载体图像的局部信息而发起攻击,此种攻击的强度通常较高,对应表 1 中检测结果 C 类.以局部剪切攻击为例,当待测图像受到图 10 篡改情况下本文算法的效果如下:载体图像 PSNR 值为 23.6868,鲁棒水印 NC 值为 0.9893,半脆弱水印检测结果为局部强篡改.具体效果分别如图 11、图 12 所示.局部破坏依然会被定位检测出来,并触发恢

复操作,其恢复效果与图 9 相同,限于篇幅原因此处不再赘述.

图6　局部篡改图像

图7　鲁棒水印效果

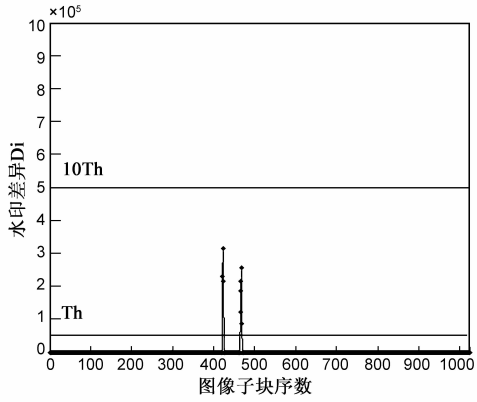


图8　半脆弱水印效果

图9　恢复效果图

图10　局部剪切图像

图11　鲁棒水印效果

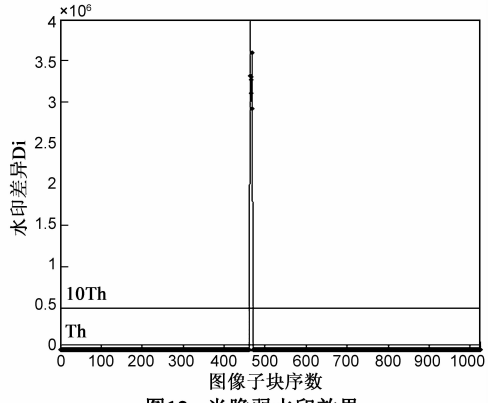


图12　半脆弱水印效果

载体图像在传输过程中难免会遇到诸如噪声等全局性因素的影响,导致其内容质量整体下降,对应表 1 中检测结果 D、E 类.以图像传输过程中常见的椒盐噪声为例.含有椒盐噪声的待测图像如图 13 所示,噪声密度 0.05,含噪声图像 PSNR 值为 17.4643,鲁棒性水印 NC 值为 0.8259,效果如图 14,半脆弱水印的检测效果如图 15 所示.由于半脆弱水印的检测结果为全局篡改,所以该过程会触发全局恢复,完全重建原始图像.为了避免出现块效应,系统会对所有图像块进行恢复.

图13　加入椒盐噪声的待测图像

图14　鲁棒水印效果

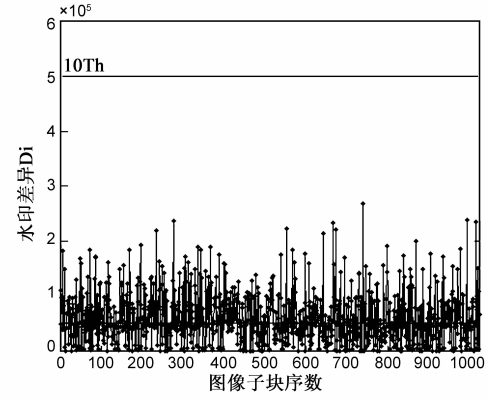


图15　半脆弱水印效果

对于表 1 中 F 类检测结果来说,半脆弱水印的检测结果为全局强篡改,此时的图像降质严重,失去了视觉意义.但也有例外情况出现,如图 16 所示,当故意对每个图像块都进行破坏性攻击时,待测图像 PSNR 值为 8.4175;鲁棒性水印的检测结果如图 17 所示,NC 值为 0.9921;半脆弱水印检测结果如图 18 所示.

半脆弱水印检测出全局篡改会进一步触发图像的全局恢复操作,之后只要经过一个简单的验算过程即可确定版权的真伪.本文简单采用图像相关系数衡量恢复前后两幅图像的相似程度,当相关系数超过 0.55

认为图像具有版权.计算两幅 $m \times n$ 图像 I 和 J 之间的相关系数的公式如式(24)

$$\rho = \frac{\sigma(I,J)}{\sqrt{D_I D_J}} \tag{24}$$

其中 $\sigma(I,J)$为 I 和 J 的协方差,D_I 和 D_J 分别为 I 和 J 的方差.全局恢复将不含水印图像恢复为图3所示的原始图像,两幅图像之间的相关系数为 $\rho = 0.5937$.

文献[3]提出了基于 SVD 的经典鲁棒性水印算法的安全性问题,如果对于一幅如图 19 所示的不含水印的图像宣称版权,也可以从中提取出较为清晰的伪造鲁棒性水印,NC 值高达 0.9844,如图 20 所示.对于本文所设计的系统,此种伪造水印将无法发挥作用.因为导致提取出伪造水印的鲁棒水印密钥同时也决定了半脆弱水印的生成密钥,所以即使从待测图像中提取出了清晰的伪造水印,半脆弱水印也会检测出与之相悖的结果,如图 21 所示.而半脆弱水印检测出全局篡改又会进一步触发图像的全局恢复操作,将待测图像完全替换成另一幅含有水印的图像,之后只要经过验算即可确定版权的真伪.

图16 被故意破坏的图像

图17 鲁棒性水印的检测效果

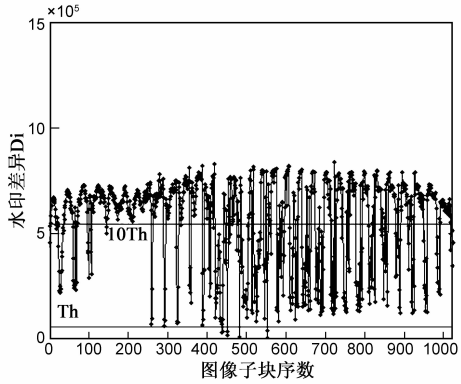


图18 半脆弱水印的检测效果

图19 不含水印的测试图像

图20 伪造水印

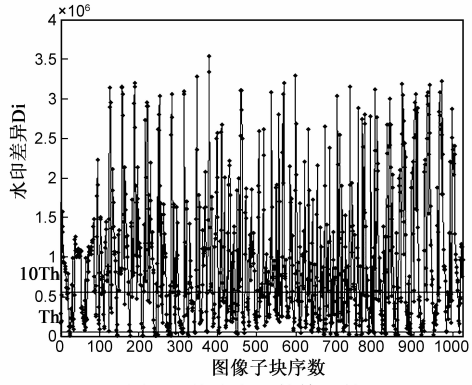


图21 伪造水印的检测效果

经过全局恢复后,不含水印图像将被恢复为图3所示的原始图像,两幅图像之间的相关系数为 $\rho = 0.0944$.可见两幅图像之间几乎没有相似之处,据此可以判定待测图像并非版权图像.

6 结论

本文提出了一种交互支持双水印算法,利用零水印技术减少了双水印对原始图像视觉效果的影响,有效避免了两种水印之间的干扰.压缩感知理论的引入实现了两种水印之间的交互支持,鲁棒水印为半脆弱水印的生成提供观测矩阵及保密支持;半脆弱水印可以增强鲁棒水印的性能并验证其密钥的真实性.另外本文算法还通过综合两种水印的提取效果对图像所经受的攻击类型做出了进一步的判断,实现更深层次的交互支持,为进一步判断待测图像所经历的操作提供了依据.

参考文献

[1] 叶天语,钮心忻,杨义先.多功能双水印算法[J].电子与信息学报,2009,31(3):546 – 551.
Ye T Y,Niu X X,Yang Y X.A multi-purpose dual watermark algorithm [J].Journal of Electronics & Information Technology,2009,31(3):546 – 551.

[2] 刘瑞祯,谭铁牛.基于奇异值分解的数字图像水印方法[J].电子学报,2001,2(2):168 – 171.
Liu R Z,Tan T N.SVD based digital watermarking method [J].Acta Electronica Sinica,2001,2(2):168 – 171.

[3] Zhang X P,Li K.Comments on "An SVD-based watermarking

scheme for protecting rightful ownership"[J]. IEEE Transactions on Multimedia,2005,7(3):593 – 594.

[4] 石光明,刘丹华,高大化等.压缩感知理论及其研究进展[J].电子学报,2009,37(5):1071 – 1081.
Shi G,Liu D,Gao D,et al. Advances in theory and application of compressed sensing [J]. Acta Electronica Sinica,2009,37(5):1071 – 1081.

[5] D L Donoho. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory,2006,52(4):1289 – 1306.

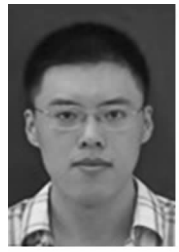
[6] 温泉,孙琰锋,王树勋.零水印的概念与应用[J].电子学报,2003,31(2):214 – 216.
Wen Q,Sun T,Wang S. Concept and application of zero-watermark [J]. Acta Electronica Sinica,2003,31(2):214 – 216.

[7] Donoho D. For most large underdetermined systems of linear equations,the minimal ell-1 norm solution is also the sparsest solution [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics,2006,59(6):797 – 829.

[8] Baraniuk R, Davenport M, DeVore R, Wakin M. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices [J]. Constructive Approximation,2008,28(3):253 – 263.

作者简介

赵春晖　男.1965 年生,黑龙江人.教授、博士生导师.1986 年、1989 年分别在哈尔滨工程大学获得工学学士、硕士学位,1998 年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位.主要研究方向为智能信息与图像处理、非线性信号处理和通信信号处理.
E-mail:zhaochunhui@hrbeu.edu.cn



刘　巍　男.1982 年生,北京人.2006 年、2008 年和 2011 年分别在哈尔滨工程大学获得工学学士、硕士和博士学位,主要研究方向为非线性信号与图像处理,压缩感知技术.
E-mail:liuwei16@hrbeu.edu.cn