

一种分块压缩感知变采样率的指纹图像水印算法*

赵慧民, 蔡 君, 魏文国

(广东技术师范学院电子与信息学院, 广东 广州 510665)

摘 要: 指纹图像水印是数字内容保护的重要应用领域, 而鲁棒性是其实现的关键技术。针对指纹数字内容的水印化保护问题, 提出一种分块压缩感知水印(Block compressed sensing watermark, BCSW)变采样率实现方法。首先对指纹图像进行DWT变换, 并对每级每个子带分别进行分块压缩感知测量处理, 并将观测值作为水印信息嵌入到载体图像。实验结果表明, 相对于联合DWT-DCT和DCT以及SCD水印算法, BCSW算法具有更好的鲁棒性, 同时具有更高的准确性和安全性。

关键词: 压缩感知; 指纹图像; 变采样率; 内容认证; 水印

中图分类号: TP309.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2014)05-0014-06

Fingerprint Image Watermarking Algorithm Based on Block Compressed Sensing with Variable Sampling Rates

ZHAO Huimin, CAI Jun, WEI Wenguo

(School of Electronic and Information, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract: Content protection of fingerprint image is an important application field for information security, and robustness is a key techniques. An actualization method of block compressed sensing watermarking (BCSW) with variable sampling rates is proposed to aim at content security protection problem. Firstly, the watermark image of fingerprint is performed discrete wavelet transform (DWT), and divided into several sub block in which the block size can be adjusted according to structure features of the blocking image. Secondly, block-based compressed-sensing sampling is deployed independently within each sub-band of each decomposition level of a wavelet transform of an image. Finally, the formed watermark data are embedded into all sub-blocks of the LL_n sub-band of the transformed host image by using quantization technique. Experimental results show that the introduction of compressed sensing theory improves the robustness and security of the protected fingerprint image.

Key words: compressed sensing; fingerprint image; variable sampling rates; content protection; watermark

数字内容保护是多媒体信息安全应用的一个重要组成部分。数字媒体的特点使得对其内容的修改和攻击十分容易, 越来越多的新技术被用于对数字媒体进行不留明显痕迹的更改和编辑, 使数字媒体内容的真实性存在很大的疑问, 阻碍了数字信息在

重要、正式场合的应用^[1-3]。目前, 解决这一问题的一个主流方法是基于数字水印实现的主动认证技术。数字水印数据一般需要通过酉变换(如FFT、DCT、DWT或DCT+DWT等)对图像进行处理后, 再结合随机扰乱和加密产生。但是, 从数字信

* 收稿日期: 2014-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272381); 广东省自然科学基金资助项目(S2012010008639); 广东省教育厅科技创新资助项目(2013KJCX0118); 广州市科技计划资助项目(2014J4100078)

作者简介: 赵慧民(1966年生), 男; 研究方向: 信号与信息处理, 信息安全技术; E-mail: zhaohuimin@tom.com

号处理和信息理论来看, 这种技术的最大问题是, 以西变换为准则得到的水印数据很难折中水印码长、嵌入容量、水印透明性以及鲁棒性之间的关系^[4-5]。

近年来一个新的理论—压缩感知在信号处理中的出现引起了学术界的特别关注。压缩感知 (Compressed Sensing, 简称 CS) 理论由美国科学院院士 D. Donoho、E. Candes 及菲尔兹奖获得者华裔数学家陶哲轩等人所开创。CS 的原理是将图像数据的压缩与采样合并进行。其核心技术是信号的稀疏变换、稀疏信号的非相关测量矩阵及信号的重建算法, 它突破了 Shannon's/Nyquist 采样理论的极限, 能够以随机采样的方式用更少的数据采样点来准确地恢复原始信号。因此, CS 观测值作为原图像的完整描述, 涵盖了其所有的特征并且数据量远少于原图像, 符合水印透明性对数据量的要求。CS 观测值所具有的计算保密性 (Computational secrecy) 保证了攻击者在不具备密钥先验知识的情况下无法通过观测值推测原始图像的内容, 满足了水印对安全性的要求。因此, 与现有其他水印算法相比, 基于 CS 的水印算法对原始图像的信息提取更加全面、安全性更好。

另一方面, 用生物指纹数据作为水印是信息隐藏及其保密电子信息交互研究的焦点。它需要安全地保护指纹图像数据, 且可逆地提取图像特征并构造完整性指纹^[6-9]。

综合压缩感知生成水印数据的特点以及指纹图像水印化的要求, 本文提出了一种基于分块压缩感知的指纹图像水印算法 (Block compressive sensing based fingerprint image Watermarking, BCSW), 用以解决数字图像信息认证和版权保护的准确性和安全性问题。

本文对指纹图像进行 DWT 变换, 并在变换的每一级每个子带根据指纹特征数据大小对图像进行分块且同时进行多尺度变采样率观测, 这样保证了水印数据量的问题。接着, 再对所有图像子块观测值组合并生成随机水印数据, 并嵌入到载体图像的系数中。指纹图像恢复时, 在 DWT 域利用多尺度变换和 SCS-SPL 技术高精度重构指纹图像, 这样解决了指纹图像的可靠性恢复和完整性的应用目的。

1 分块 CS 采样与 BCS-SPL 技术

CS 理论说明^[7], 假设信号 $x \in \mathbf{R}^N$ 为从 M 个采样信号中获得的长度为 N 的信号, 且 $M \ll N$ 。那么, 我们可以从 (1) 式中恢复信号 x :

$$y = Ax \quad (1)$$

其中, y 的长度为 M , 而 A 为 $M \times N$ 测量矩阵 (也称为观测矩阵), 且具有子采样率 $S = M/N$ 。如果 x 在某个变换矩阵 Ψ (如 DCT, DWT 等) 下是稀疏的, 即有:

$$x = \Psi\alpha, \|\alpha\|_0 < K \quad (2)$$

这里, α 为稀疏系数, $\|\alpha\|_0$ 表示 0-范数, 即稀疏系数非 0 的个数。这时, (1) 式变为:

$$y = A\Psi\alpha \quad (3)$$

可以证明, 当测量维数满足 $K < M < N$ 时, 信号 x 可以通过解决 0-范数或 1-范数下的优化问题从 $M = O(K \log N)$ 个测量数据中高概率重构 x 。

对于一维信号测量矩阵 A 可采用高斯随机矩阵或伯努利二值随机矩阵等生成。但是, 对于二维图像信号, N 的长度非常大, 如 128×128 的图像 N 的长度为 10^4 等级。因此, A 的计算量很大且难以存储。这样, CS 在 2D 图像中应用受到较大限制。为此, 文献 [10] 提出一个分块 CS 技术 (Block-based CS, BCS)。在 BCS 中, 一个图像被分成 $B \times B$ 块, 并使用一个近似大小的测量矩阵进行采样。假设 x_i 表示了通过 Z 行扫描输入的第 i 个图像块的向量, 那么有:

$$y_i = \Phi \cdot x_i \quad (4)$$

其中, Φ 为 $M_B \times B^2$ 大小的测量矩阵。因此, 整个图像的采样率为 $S = M_B/B^2$ 。这时, (1) 式中整个图像的测量矩阵 A 具有对角型结构性矩阵 $A = \text{diag}(\Phi)$, 其形式为:

$$A = \begin{bmatrix} \Phi & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Phi & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \Phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

在文献 [10] 提出的 BCS 算法中, 图像的采样通过分块基的随机矩阵实现, 而图像的重构结合平滑滤波器由投影 Landweber 算法实现。因此, 它的整个实现技术称为 BCS-SPL。BCS-SPL 技术在采样观测端实现了对图像结构的近似描述, 而在图像恢复时实现了高精度逼近。因此, 利用 BCS-SPL 技术对指纹图像进行水印化处理可以充分利用水印数据的稀疏表示性和随机性特点, 同时能够兼顾主动信息认证对指纹图像重构的准确性要求^[11]。这就是本文研究应用的出发点。

2 指纹图像的多尺度 BCSW 算法

2.1 DWT 对指纹图像的 BCS 采样设置

指纹图像是方向性极强的纹理图像, 因此, 结

合多尺度 DWT 域对 BCS-SPL 算法的实现研究, 我们利用 (5) 式对指纹图像进行方向性观测。把测量矩阵 \mathbf{A} 分成两个部分: 一个是 DWT 多尺度变换矩阵 $\mathbf{\Omega}$, 另一个是多尺度分块测量矩阵 $\mathbf{\Phi}'$, 即 $\mathbf{A} = \mathbf{\Phi}'\mathbf{\Omega}$ 。这时图像的观测结果为

$$y = \mathbf{\Phi}'\mathbf{\Omega} \cdot x \quad (6)$$

假设 $\mathbf{\Omega}$ 进行 L 级 DWT 分解。那么, 在分解的每一级, $\mathbf{\Phi}'$ 组成 L 个不同的分块采样实现矩阵。这时, 图像 x 的 DWT 变换形式为 $\bar{x} = \mathbf{\Omega}x$ 。则, \bar{x} 在 l 级子带被分成 $B_l \times B_l$ 块, 并通过适当大小的矩阵 $\mathbf{\Phi}_l$ 进行采样 (其中 $l=L$ 为最高级分辨率)。

假设 $x_{l,s,j}$ 是第 l 级子带 s 上的第 j 块图像的向量表示, 且满足 $s \in \{H, V, D\}, 1 \leq l \leq L$ (H 表示水平方向子带, V 为垂直方向子带, D 为对角方向子带)。那么, CS 的观测值为

$$y_{l,s,j} = \mathbf{\Phi}_l \cdot x_{l,s,j} \quad (7)$$

由于不同级的小波分解对图像重构有不同的重要性, 因此, 本文在每一个 l 级都会调整采样过程以产生不同的采样率 S_l 。其中, 设置 DWT 基带子率为全采样率, 即 $S_0 = 1$ 。

设 W_l 为 l 级的子率加权系数, 那么 l 级的子率 S_l 为

$$S_l = W_l \cdot S' \quad (8)$$

则, 整个图像的采样率为

$$S = \frac{1}{4^L} S_0 + \sum_{l=1}^L \frac{3}{4^{L-l+1}} W_l S' \quad (9)$$

可见, 当已知图像的目标采样率 S 和加权系数 W_l 后, 由 (9) 式很容易求出 S' , 由此再通过 (8) 式得到 l 级的子率 S_l 。但是, 这种处理会产生一个或多个 $S_l > 1$ 的情况。所以, 我们必须对此进行改进并迫使所有 l 级情况下 $S_l \leq 1$ 。由 (8) 和 (9) 式求得 S' 和 S_1 后, 我们检查是否 $S_1 > 1$ 。如果 $S_1 > 1$ 成立, 设置 $S_1 = 1$, 代入 (9) 式, 可以得到:

$$S = \frac{1}{4^L} S_0 + \frac{3}{4^L} S_1 + \sum_{l=2}^L \frac{3}{4^{L-l+1}} W_l S' \quad (10)$$

求出 S' , 再次通过 (8) 式重新确定 $l=2, \dots, L$ 情况下的子率 S_l 。重复此过程, 直到所有 l 级情况下 $S_l \leq 1$ 。

特别地, 经过多次实验, 子率加权系数 W_l 通过下式确定:

$$W_l = 16^{L-l+1} \quad (11)$$

2.2 BCSW 数据的构造

图像作为对成像场景的一个采样, 其像素数量的下限是受采样定律限制的。而 CS 突破了采样定

律的限制, 可以进一步通过线性投影的方式将图像映射成一个更为简洁的形式^[12]。图 1 为本文提出的 BCSW 的实现过程。

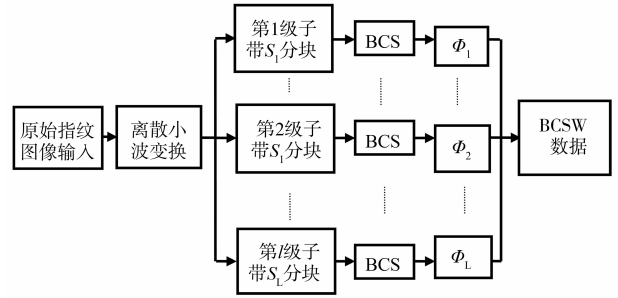


图 1 BCSW 实现过程

Fig. 1 Processing of BCSW

在图 1 中, 首先将原始指纹图像进行 9/7 Harr 小波变换, 在每级每个子带上进行 $B_l \times B_l$ 分块, 再对各子块进行 BCS 采样设置, 并通过观测矩阵 $\mathbf{\Phi}_l$ 对各个子块进行变采样观测, 最后将观测值组合在一起生成水印数。图中, 图像分块的大小由期望生成的水印数据量和指纹图像的重构精度决定。

假设指纹图像大小为 $M_1 \times M_2$, BCSW 的数据长度为 M , 那么每个子块各取的观测值为 $m = \lfloor MB_l^2 / M_1 \times M_2 \rfloor$ 。如果 l 级子带 s 上的第 j 块观测值为 $y_{l,s,j} (j = 1, 2, \dots, B_l^2)$, 那么, 在 DWT 域形成的归一化 BCSW 数据形式如 (12) 式所示:

$$Y_w = \begin{bmatrix} y_{1,1,1} \\ \vdots \\ y_{1,4,B_l^2} \\ \vdots \\ y_{L,4,B_l^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1,1,1} & y_{2,1,1} & \cdots & y_{L,1,1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{1,2,1} & y_{2,2,1} & \cdots & y_{L,2,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1,4,B_l^2} & y_{2,4,B_l^2} & \cdots & y_{L,4,B_l^2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于采用了 CS 理论, 所以水印的生成仅是一个简单的线性投影过程。水印生成的时间复杂度取决于观测矩阵的大小。设生成 BCSW 观测矩阵的种子为 k_1 , 分块大小策略为 k_2 , 那么 k_1 和 k_2 可以作为水印密钥进行保存。将水印密钥 k_1 和 k_2 注册到相关内容认证和完整性保护数据库中, 并获得一个唯一的注册 ID 号, 该 ID 号与图像信息、水印密钥信息均登记在案, 如此指纹图像即处在水印技术的保护之下了。

为了进一步提高水印数据的安全性, 基于扩频技术原理, 本文用扩频系数 cr 对图像观测数据的二进制水印序列 $Y_w = \{y_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 进行处理, 经过扩频形成扩展序列 E , 再与密钥随机种子

函数 $s = \text{randseed}(K, M)$ 进行置乱调制形成水印数据向量基 W ：

$$y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}, \quad y_i \in \{0, 1\}, \quad i \in M \quad (13)$$

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, \quad e_i = y_i, \\ j \cdot cr \leq i \leq (j+1) \cdot cr, \quad cr > 1, i, j, cr \in M \quad (14)$$

$$w_i = \{w_0, w_2, \dots, w_{M-1}\}, w_i = e_i \cdot s, \quad i \in M \quad (15)$$

$$W = W(l, s, j) = \{w_i, i = 1, \dots, N^2/B_k^2 \in M\} \quad (16)$$

这里，我们把 W 的扩展过程作为密钥 k_3 。

2.3 BCSW 数据的嵌入

嵌入 BCSW 数据时，首先要对载体图像进行处理，然后根据 HVS 特性选择嵌入区域。具体实现过程如下：

1) 对大小为 $N \times N$ 的载体图像 I 进行 DWT 分解成 l 级，并选择 LL_l 作为嵌入区域。这里 l 的大小是由水印的不可见性、鲁棒性要求以及抗攻击能力经过实验综合决定。

2) LL_l 子带划分成大小为 $M_k \times M_k$ 的子块 B_k 。其中， B_k 的数量 K 和载体图像大小 N 以及分级 l 的关系为 $N = M_k \times K \times 2^l$ 。

3) 按照公式 (17) 量化 LL_l 的系数并嵌入 BCSW 数据到所有子块中。

$$q_l(i, j) = \begin{cases} mQ & mQ < q_l(i, j) \leq (m+0.5)Q \\ (m+1)Q & (m+0.5)Q < q_l(i, j) \leq \\ (m+1)Q, & W(l, s, j) = 1 \end{cases} \\ q'_l(i, j) = (m+0.5)Q \quad W(l, s, j) = 0 \quad (17)$$

这里， $q_l(i, j)$ 表示子块 B_l 的系数， $q'_l(i, j)$ 代表图像 i, j 位置经过量化后的 B_l 的系数。 $W(l, s, j)$ 为被嵌入的水印数据， m 是整数， Q 为量化步长。

4) 运用嵌入水印数据后新的小波系数重构载体图像。

在嵌入水印数据实验时，量化步长 Q 的选择是影响图像质量的关键因素。量化步长要满足良好视觉效果情况下，保持水印具有较好的鲁棒性。本文通过载体图像信息熵和嵌入的子块 B_k 的大小共同确定 Q 值。载体图像信息熵为

$$H(P) = - \sum_{i,j} P(i, j) \log_2 P(i, j) \quad (18)$$

其中， $P(i, j) = X(i, j) / \sum_{i,j} X(i, j)$ ，而 $X(i, j)$ 表示子带系数在 i, j 位置出现的次数。图像信息熵越大，图像复杂度越高，所能嵌入的水印数据越大。

因此，不同嵌入子块系数的量化步长 Q 由信息熵 $H(P)$ 和 B_k 的大小共同决定：

$$Q = 3 \log_2(H(P)M_k^2) + 2\lambda M_k^2 \quad (19)$$

λ 为量化步长的调节因子。

2.4 BCSW 数据的检测和提取

BCSW 数据的检测和提取是水印构造的逆过程。首先，通过密钥 k_1 和 k_2 信息确定分块大小和 BCS 的观测矩阵 Φ_l 。然后，得到第 l 级子带 s 上的第 j 块图像的观测数据 $y'_{l,s,j} = \Phi_l \cdot \bar{x}'_{l,s,j}$ 。再按照公式 (20) 对每个子块的观测数据 $y'_{l,s,j}$ 进行操作，取得混合图像的 BCSW 向量基 $W'(l, s, j)$ 。最后，根据密钥 k_3 从 $W'(l, s, j)$ 向量基中得到指纹图像的观测估计值 $Y''_w = \{y''_i, i = 1, 2, \dots, M\} = \{y''_{l,s,j}\}$ 。具体的实现流程如图 2 所示。

$$W'(l, s, j) = \begin{cases} 1, & (m-0.25)Q \leq q_l(i, j) \leq (m+0.25)Q \\ 0, & (m+0.25)Q < q_l(i, j) < (m+0.75)Q \end{cases} \quad (20)$$

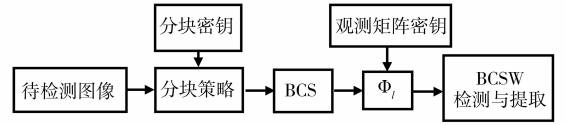


图 2 BCSW 数据的检测和提取过程

Fig. 2 Detection and extraction of the BCSW data

2.5 根据 BCSW 重构指纹图像

针对信息认证的准确性，需要能够得到高质量的二维原始水印信号。因此，这里我们借鉴 CS 理论的 BCS-SPL 重构算法来恢复原始指纹图像。设指纹图像第 l 级子带 s 上的第 j 块数据的初始估计条件为

$$\bar{x}'_{l,s,j}^{(0)} = \Phi_l^T \cdot y'_{l,s,j} \quad (21)$$

那么，根据 BCS-SPL 算法得到整幅指纹图像数据的迭代过程如下：

$$\bar{x}'_{l,s,j}^{(i)} = \bar{x}'_{l,s,j}^{(i-1)} + \Phi_l^T (y'_{l,s,j} - \Phi_l \bar{x}'_{l,s,j}^{(i-1)}) \quad (22)$$

其中， $\bar{x}'_{l,s,j}$ 是 $\bar{x}_{l,s,j}$ 在第 l 级子带 s 上的第 j 块图像数据的估计值。对于大小 $M_1 \times M_2$ 的指纹图像，我们用相似性值 NC 来对比和衡量恢复的指纹图像和原始指纹图像的相似程度：

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W(i, j) W'(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W^2(i, j)} \quad (23)$$

3 实验结果

为了分析本文提出算法对指纹图像保护内容的实现性能, 我们使用 512×512 Lenna 和 Pepper 作为载体图像, 并通过 Veridicom 公司指纹传感器 FPS200 采集 256×256 的灰度指纹图像作为水印图像。实验时, 指纹图像使用 3 级 9/7 Harr 基 DWT

作为尺度因子, 用标准伪随机数均匀分布序列矩阵 U 、 V 和中心傅立叶变换 F 生成随机测量矩阵 $\Phi = UVF$ 。通过 Φ 对稀疏后的图像第 l 级子块 $B_l \times B_l$ 进行随机观测和采样, 其中 $l = 1, 2, 3$ 时 $B_l = 16, 32,$ 和 64 。当子采样率 $S = 0.1$, 图 3 (b)、(c)、(d) 分别说明了稀疏度 $K = 0.66, 0.59, 0.5$ 对指纹图像的一种观测结果。

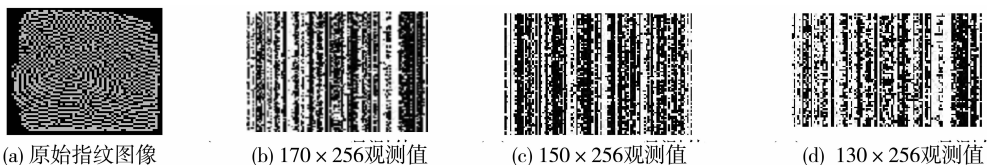


图 3 原始指纹图像的 BCS 观测值

Fig. 3 BCS measurements of original fingerprint

3.1 图像的透明性分析

把图 3 的指纹观测值 150×256 的数据作为水印信息分别嵌入到 Lenna 和 Pepper 图像中, 其中载体图像的量化步长为 $Q = 35$, 图 4 说明了实验结

果。为了说明原始载体图像与嵌入指纹水印后混合载体图像的本质区别, 图 5 用直方统计图说明了信号强度统计曲线。由图可见, 原始载体图像和混合载体图像直方图相似, 说明了图像的透明性较好。



图 4 图像的透明性分析

Fig. 4 Transparency analysis of image

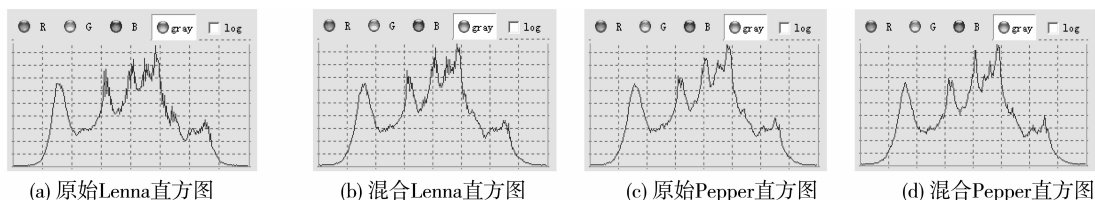


图 5 Lenna 和 Pepper 图像的直方统计图

Fig. 5 Histograms of Lenna and Pepper

3.2 水印的鲁棒性分析

为了分析水印的鲁棒性, 当 $S = 0.1$ 和 $Q = 35$ 时, 我们分别用不同的攻击行为对嵌入指纹数据的混合载体图像进行攻击实验。攻击行为包括对图像进行 JPEG 压缩, 高斯噪声, 中值滤波以及图像的马赛克攻击。图 6 分别说明了攻击后混合载体图像相似性值 NC 的结果, 并在同等实验条件下分别

和文献 [13] 的联合 DWT 水印算法以及 DCT 水印算法以及文献 [14] 的 W-SVD 算法进行了比较。

4 结论

在 DWT 域基于 BCS 和可变采样率, 本文提出了一种分块压缩感知的指纹图像水印实现算法。指纹图像通过压缩感知获得的观测值包含了原始指纹

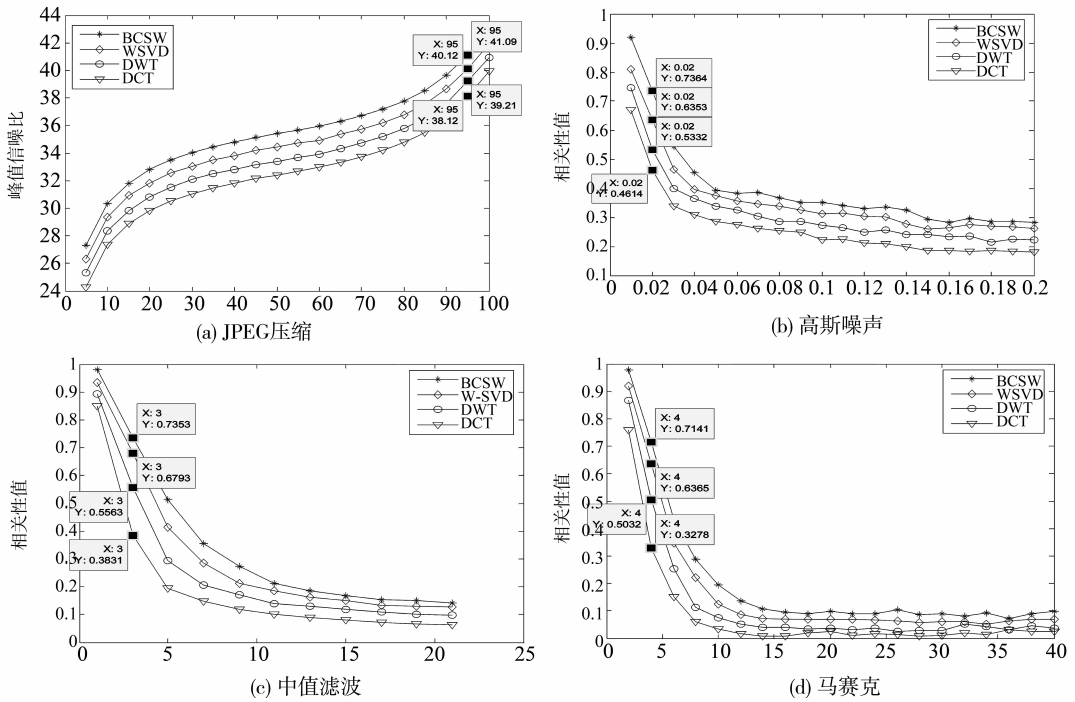


图 6 不同攻击条件下相似性值 NC 的比较结果

Fig. 6 NC comparison of various attacks

图像携带的关键信息，可以简洁而全面地表征图像的全部特征。以观测值作为水印具有操作简单（仅需要通过一个线性变换即可）、透明性好、抵抗攻击能力强和保密性高等优点，而且攻击后提取的指纹数据可以通过水印信息高概率恢复，满足了对指纹图像安全性保护要求较高的应用场合。

参考文献：

[1] AWRANGJEB M. An overview of reversible data hiding [C]. Proc of ICCIT – 2003, Bangladesh, 2003.

[2] LIN E T, DELP E J. Temporal synchronization in video watermarking[J]. IEEE Trans Signal Process, 2004, 52 (10) : 3007 – 3022.

[3] DAZHI Z, BOYING W, JIEBAO S, et al. A new robust watermarking algorithm based on dwt[C]// 2nd International Congress on Image and Signal Processing, 2009: 1 – 6.

[4] WU C P, JAY K C. Design of Integrated multimedia compression and encryption systems[J]. IEEE Trans on Multimedia, 2005, 7(5) : 828 – 839.

[5] 陈宏武, 赵慧民. 一种基于数字指纹在电子商务中的应用方法研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(3) : 41 – 46.

[6] 赵慧民, 郭一缜, 丁晓艳. 一种数字图像和指纹水印位平面合成的优化方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(6) : 64 – 67.

[7] CANDES E, ROMBERG J, TERENCE Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans On Information Theory, 2006, 52(2) : 489 – 509.

[8] 张旭坤, 马社祥. 压缩感知的量化失真分析[J]. 计算机应用, 2013, 33(1) : 295 – 298.

[9] DONOHO D L, TSAIG Y. Extensions of compressed sensing [J]. Signal Processing, 2006, 86(3) : 533 – 548.

[10] MUN S, FOWLER J E. Block compressed sensing of images using directional transforms[C]// Proceedings of the International Conference on Image Processing, Cairo, Egypt, 2009: 3021 – 3024.

[11] DO T T, TRAN T D, GAN L. Fast compressive sampling with structurally random matrices[C]// Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2008: 3369 – 3372.

[12] 赵慧民, 郭一缜, 丁晓艳, 等. 用于视频多播传输的压缩传感实现方法研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(1) : 45 – 49.

[13] ALI AL-HAJ. Combined DWT-DCT digital image watermarking[J]. Journal of Computer Science, 2007, 3(9) : 740 – 746.

[14] 谢劭, 谢建全. 一种基于奇异值分解(SVD)的改进图像水印算法[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(11) : 40 – 45.