



混合变换域数字水印在电力系统信息安全中的应用

朱少敏, 张志强

(国网北京市电力公司朝阳供电公司 北京 100020)

摘 要: 随着电力行业信息化工程的不断推进,有效实现对电力生产、运行和管理过程中应用的大量图像、音视频、三维模型等多媒体信息的安全防护,正成为电力信息安全研究与发展中的热点和亟待解决的难题之一。提出了一种新的基于混合变换域的数字图像水印算法,二值水印图像嵌入宿主图像经混合变换后的低频子带中。结合低频子带能量分布与视觉掩蔽特性,自适应地确定量化步长,通过量化修改分块低频系数矩阵奇异值实现水印嵌入。实验结果表明,该水印算法具有较好的视觉保真度和较强的顽健性,将在电力系统信息安全领域发挥更加重要的作用。

关键词: DWT-DCT;混合变换域;能量分布;视觉掩蔽特性;低频子带

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.11.014

Application of Hybrid Transform Domain Digital Watermarking in Power System Information Security

Zhu Shaomin, Zhang Zhiqiang

(Chaoyang Power Supply Company of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100020, China)

Abstract: With the rapid development of electric power information industry, a lot of multimedia products such as digital image, audio, video and three dimensional models were produced and applied during the electric power process of the production, operation and management. Therefore, how to realize digital media security effectively is becoming a challenging problem. A new image watermarking algorithm in hybrid transform domain was proposed. The secret watermark information bits were embedded into low frequency subband in hybrid transform. According to energy distribution and visual masking in low frequency subband, the singular values of the selected low frequency subband blocks were adaptively applied quantization index modulation for embedding watermark information. Experimental results show that the algorithm has good image vision fidelity. The proposed digital watermarking is playing a more important role in network security for electric power system.

Key words: DWT-DCT, hybrid transform, energy distribution, visual masking, low frequency subband

1 引言

以数字图像、音视频、三维可视化等技术为典型代表的多媒体载体,为保证电力系统的安全稳定运行发挥着重要作用^[1-3],迫切需要对这些种类繁多、格式各异的多媒体信息的安全问题进行深入研究。数字水印技术正是解决多

媒体信息安全问题的一种重要且有效的方法,在电力企业知识产权保护、保密可信文档文件传输、电力电量交易市场、数字控制信号质量评价及分析、指挥视频防护等方面有着广泛应用^[4-7]。

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)是一种重要的图像变换域分析方法,反映图像内部特征,具有

良好的奇异值稳定性,已成为数字水印研究领域一种重要的变换域方法^[8]。为了与其他变换域方法相结合,基于 DCT-SVD^[9]、DFT-SVD^[10]和 DWT-SVD^[11]相融合的水印算法被相继提出,这些算法充分利用了 SVD 的优点和其他变换域特点,不同程度地改进了水印性能。考虑到 DWT 具有多分辨率分析、时频域中表征信号局部特性强、与人眼视觉特性相一致等特性,而 DCT 具有能量压缩聚能较强的特性,参考文献[12]提出了 DWT-DCT-SVD 变换域水印算法,但该算法为非盲水印,算法安全性和实用性均不强。

本文以直观丰富的二值水印信息作为水印图像,利用量化索引调制算法原理,充分考虑能量分布特性和人眼视觉特性,实现一种新的图像盲水印算法,其具有良好的透明性和有效抵抗多种图像攻击的能力,将在电力系统信息安全领域发挥更加重要的作用。

2 算法的实现

2.1 水印嵌入算法

设宿主图像为 256 级灰度图像 $I=\{I(i,j)|0\leq i\leq m-1, 0\leq j\leq n-1\}$, 二值水印图像 $W=\{w(i,j)|0\leq i\leq p-1, 1\leq j\leq q-1\}$, 伪随机序列为 $S=\{s_i|i=1,\dots,M; s_i\in\{0,1\}\}$ 且 $M=p\times q$ 。算法实现流程如下。

(1)因为水印像素之间存在相关性,从加强信息顽健性和安全性两方面考虑,对有实际含义的二值水印图像进行一系列预处理^[13],得到待嵌入的一维度序列 W' :

$$W'=\{w'_i=(w_i\oplus s_i)|w'_i\in\{0,1\}\} \quad (1)$$

(2)对宿主图像进行 j 级 DWT 分解,得到低频子带 LL_j 和 3 个高频子带 HL_j 、 LH_j 、 HH_j 。

(3)经 DWT 分解后,在低频子带中存有图像能量。实际算法中,采用这样的子带作为水印嵌入域,既能够保持算法顽健性,又不破坏图像视觉效果。因此,将低频子带 LL_j 内加载水印,以大小为规则划分子带,且以行排列顺序进行排列,标记前 M 个子块为 $A_1, A_2, \dots, A_M$ 。

(4)对 $A_i(i=1, 2, \dots, M)$ 依次进行 DCT 和 SVD 计算,得到奇异值向量 $S^i, S^i=(\sigma_1^i, \sigma_2^i, \dots, \sigma_w^i)$, 其中 $\sigma_1^i \geq \sigma_2^i \geq \dots \geq \sigma_w^i$ 。

$$DCT(A_i)=U_i \sum_i V_i^T \quad (2)$$

(5)计算并自适应量化 S^i 向量的范数。其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整函数, δ^i 为 A_i 子块对应的量化步长。

$$N^i = \left\lfloor \frac{(\|S^i\|+1)}{\delta^i} \right\rfloor, i=1, 2, \dots, M \quad (3)$$

(6)参考文献[13]算法以二值 0、1 水印数值量化奇异值向量范数 N^i , 生成隐藏水印的新奇异值向量序列。

$$N^i = \begin{cases} N^i + 1, & \text{mod}(N^i, 2) = 1 \text{ \& } w_i = 1 \\ N^i, & \text{mod}(N^i, 2) = 0 \text{ \& } w_i = 0 \\ N^i, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$N^{ii} = \delta^i \times N^i + \frac{\delta^i}{2} \quad (5)$$

$$(\sigma_1^{ii}, \sigma_2^{ii}, \dots, \sigma_w^{ii}) = (\sigma_1^i, \sigma_2^i, \dots, \sigma_w^i) \times \left(\frac{N^{ii}}{N^i} \right) \quad (6)$$

(7)以含水印的奇异值向量为基础,重构低频系数子块矩阵 $A_i' = U_i \sum_i' V_i^T$, 并对其进行 DCT 逆变换。

(8)以 M 个 DCT 逆变换后的子块组成含水印的低频子带 LL_j' , 经过离散小波逆变换获得隐藏水印图像 I_w 。

2.2 自适应量化步长

考虑人类视觉特性和不同宿主图像纹理度的差异,保持提出算法的复杂程度在一定范围内,参考文献[14]提出以分块子块 A_i 离散余弦变化后能量,实现自适应调整对应量化步长。 A_i 子块的自适应量化步长为:

$$\delta^i = \left\lfloor \lg 2^{\overline{|D(i)|}} \times K_1 \right\rfloor / K_1 + \delta_0 \quad (7)$$

$$\overline{|D(i)|} = \frac{\sum_{a=0}^{w-1} \sum_{b=0}^{w-1} |d(a)(b)|}{w \times w} \quad (8)$$

其中, δ_0 为基础量化步长, $|d(a)(b)|$ 为 A_i 的 DCT 系数, K_1 为量化密钥。根据有关文献可知,为了避免较大程度失真,利用对数计算方法,可以将频域系数指数增长方式通过方程转变成线性增长方式,实际效果更加满足人类视觉感知特性要求^[15]。

2.3 水印提取算法

该算法的具体计算步骤如下。

(1)通过 j 级 DWT 分解隐藏的含水印的 I_w 图像,得到低频子带 LL_j' 。同样,以 $w \times w$ 大小对 LL_j' 进行不重叠分割,将前 M 个分块记为 $A_1', A_2', \dots, A_M'$ 。

(2)对 $A_i'(i=1, 2, \dots, M)$ 依次进行 DCT 和 SVD 计算,得到奇异值向量: $S^i=(\sigma_1^i, \sigma_2^i, \dots, \sigma_w^i)$ 。

$$DCT(A_i') = U_i \sum_i' V_i^T \quad (9)$$

(3)计算并自适应量化 S^i 向量的范数。



$$N'' = \left\lfloor \frac{(\|S''\| + 1)}{\delta^i} \right\rfloor, i = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

(4) 根据量化后的范数奇偶性提取一维序列^[13]。

$$w'_i = \begin{cases} 1, & \text{mod}(N'', 2) = 0 \\ 0, & \text{mod}(N'', 2) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

(5) 对提取出的一维序列进行解密并升维, 即可提取出嵌入的二值水印图像。

$$W = \{w(i, j) | 0 \leq i \leq p-1, 0 \leq j \leq q-1\} \quad (12)$$

3 实验结果与分析

本文实验宿主图像为 512 dpi×512 dpi 的 256 级灰度图像, 分别选取纹理不同的 Lena、Barbara、Baboon 和 Peppers 4 幅图像, 如图 1 所示。小波变换采用常见 haar 小波基。

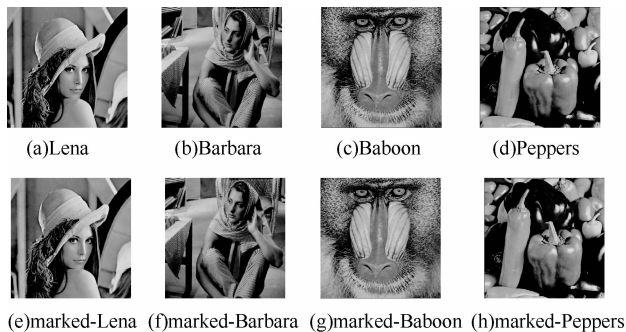


图 1 宿主图像与含水印图像

3.1 视觉保真度实验

本文算法的视觉保真度由主观评价标准和客观评价标准组成。利用所提算法得到如图 1(e)~图 1(h)的相应含水印图像, 可以看出, 主观上人眼察觉不到隐藏信息带来的图像畸变和失真。客观评价标准使用常用峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 为对比值。

$$PSNR(I_w, I) = 10 \times \lg \frac{255 \times 255 \times m \times n}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I_w(i, j) - I(i, j))^2} \quad (13)$$

表 1 列出 4 种不同纹理图像水印嵌入前后的 PSNR 值, 得出的数值均满足大于 36 dB 的要求, 视觉差异度下,

表 1 水印嵌入前后图像间的 PSNR

图像	本文算法 PSNR
Lena	36.201 0
Barbara	36.255 8
Baboon	36.318 6
Peppers	36.299 7

保真效果较好。

3.2 顽健性实验

选取提取出水印与原始水印之间正确率 (bit correct ratio, BCR)、归一化相关系数 (normalized correlation, NC) 和作为水印算法顽健性的评价标准。

$$NC(W', W) = \frac{\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} w(i, j) w'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} w^2(i, j)} \sqrt{\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} w'^2(i, j)}} \quad (14)$$

$$BCR(W', W) = \frac{\sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} w'(i, j) \oplus w(i, j)}{p \times q} \times 100\% \quad (15)$$

采用本文提出的隐藏水印提取方法, 在含水印图像没有遭受修改时, 提取出的水印 $BCR=100\%$, $NC=1$, 完整地还原了隐藏所嵌入的二值水印图像。

以 Lena 含水印图像为例, 检验本文算法在各种攻击性下的顽健性。攻击实验主要对图像 JPEG 压缩、图像滤波、添加噪声、增强图像、重采样和切割等常见图像进行处理和攻击。

(1) 图像 JPEG 压缩

以 JPEG 压缩为代表的有损压缩算法是常见的图像处理办法。从表 2 可以看出, 算法能够很好地抵抗 JPEG 压缩。图像经品质因素 (quality factor, QF) 为 30 以上的 JPEG 压缩, 实现完好提取水印。当品质因素设定为 18 时, NC 仍然高达 0.887 6, BCR 为 89.36%。

表 2 抗图像 JPEG 压缩评价指标

QF	NC	BCR
30	1.000 0	100
20	0.974 0	97.55
18	0.887 6	89.36

(2) 图像滤波

实现平滑图像的低通滤波对含有水印的图像顽健性有较大影响。实验结果见表 3, 本文算法的抗滤波性能能力强, 低通特性较好。

表 3 抗图像滤波评价指标

滤波类型	参数	NC	BCR
均值滤波	掩模大小: 3×3	0.918 3	92.25
高斯滤波	掩模大小: 3×3 标准方差 0.5	0.993 6	99.45
中值滤波	掩模大小: 3×3	0.969 0	97.07

(3)图像噪声

在互联网环境下传输含水印图像过程中,外部环境噪声干扰等因素容易形成含噪图像。实验结果见表 4,本文算法在抵抗加性噪声方面具有较好的顽健性。

表 4 抗图像噪声评价指标

噪声类型	参数	NC	BCR
高斯噪声	方差 0.5%	0.741 8	75.10
椒盐噪声	噪声密度 0.5%	0.938 9	93.26
乘性噪声	方差 0.5%	0.953 8	95.65

(4)图像增强

抗图像增强评价指标见表 5,本文算法对图像增强的顽健性极强。在图像亮度和对比度增强时,均可完整提取水印。

表 5 抗图像增强评价指标

增强类型	参数	NC	BCR
亮度增强	增强 100%	1.000 0	100
对比度	增强 100%	1.000 0	100

(5)图像模糊

抗图像模糊评价指标见表 6,图像模糊降低了对比度,产生朦胧柔化图像效果。实验表明,含水印图像经反复模糊后,算法性能稳定。

表 6 抗图像模糊评价指标

模糊次数	NC	BCR
1	0.899 1	90.45
2	0.827 4	83.55
3	0.771 0	78.10

(6)图像缩放

通过先将含水印图像缩放为原图的 n 倍,在提取水印前再将此图像缩放还原为 $1/n$ 倍的方法,实现图像缩放。实验结果见表 7,本文算法对缩放攻击有很强的顽健性。

表 7 抗图像缩放评价指标

缩放尺度	NC	BCR
1/4	0.897 6	90.28
1/2	0.996 4	99.66

(7)图像剪切

对含水印图像进行比例分别为 25%和 50%的图像剪切,实验结果见表 8,本文算法有较好的抗剪切攻击能力。

表 8 抗图像剪切评价指标

剪切比例	NC	BCR
25%	0.863 0	86.99
50%	0.734 3	74.24

3.3 同类算法比较

为了对比分析本文算法性能,将本文所提出的方法分别与参考文献[8]、参考文献[9]和参考文献[11]提出的算法在顽健性相关评价标准等方面进行比较。参考文献[8]在空间域上,直接修改像素块奇异值向量,实现空间域盲水印;参考文献[9]通过修改 DCT 分解后的分块矩阵奇异值,提出基于 DCT-SVD 的盲水印;参考文献[11]实现了修改 DWT 分解得到分块矩阵奇异值后自适应的 DWT-SVD 盲水印。实验结果比较见表 9~表 11。

表 9 本文算法与参考文献[8]实验结果对比

攻击类型	参数	本文算法 NC	参考文献[8] 算法 NC
图像缩放	$n=1/2$	0.996 4	0.925 0
高斯滤波	掩模大小:3×3 标准方差 1	0.928 4	0.899 6
中值滤波	掩模大小:3×3	0.969 0	0.938 3
高斯噪声	方差 0.1%	0.987 4	0.959 0
椒盐噪声	噪声密度 0.5%	0.938 9	0.932 3
JPEG 压缩	$QF=25$	0.999 7	0.913 8

表 10 本文算法与参考文献[9]实验结果对比

攻击类型	参数	本文算法 NC	参考文献[9] 算法 NC
JPEG 压缩	$QF=30$	1.000 0	0.671 4
JPEG 压缩	$QF=20$	0.974 0	0.275 9
图像模糊	模糊 3 次	0.771 0	0.697 3
图像剪切	剪切比例 25%	0.863 0	0.899 9
图像剪切	剪切比例 50%	0.734 3	0.796 9

表 11 本文算法与参考文献[11]实验结果对比

攻击类型	参数	本文算法 BCR	参考文献[11] 算法 BCR
JPEG 压缩	分块大小:4×4		
Lena	$QF=50$	100	96.96
Lena	$QF=40$	100	91.68
Peppers	$QF=50$	100	98.56
Peppers	$QF=40$	100	94.24
Baboon	$QF=50$	100	99.52
Baboon	$QF=40$	100	98.40

从实验结果中可以看出,本文算法在相同攻击类型和参数下,整体顽健性要优于其他 3 种相似算法,尤其在 JPEG 压缩攻击方面,具有显著优势。

4 结束语

本文提出一种基于混合 DWT-DCT 的图像水印算法。



通过大量实验结果得出,本文算法具有较好的图像逼真度,能够有效地抵抗多种图像处理方法。算法的深入研究对保障多媒体信息在智能电网、物联网等领域的广泛应用,提供了有效的信息安全保障,为进一步有效整合和安全可靠地使用这些多媒体资源提供了有益的探索和解决方法。

参考文献

- 1 胡炎,谢小荣,韩英铎等. 电力信息系统安全体系设计方法综述. 电网技术,2005,29(1):35~39
- 2 胡炎,谢小荣,辛耀中. 一种量化的电力信息系统安全体系设计方法. 电网技术,2006,30(2): 7~13
- 3 傅书遏. 2007年IEEE PES学术会议电网调度自动化部分综述与讨论. 电网技术,2008,32(5):31~37
- 4 涂蓉晖,赵继英. 基于小波变换和量化理论的半脆弱数字声音水印算法及在电力系统中的应用. 中国电机工程学报, 2005, 25(12):78~85
- 5 王先培,游文霞,王泉德等. 数字水印技术在电力系统文档可信传输中的应用. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 61~64
- 6 吴军基,盛琪,贺济峰等. 小波数字水印在电力系统信息安全中的应用. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 40~42
- 7 尹成群,李丽,吕安强等. 视频水印技术在电力系统中的应用. 继电器, 2007,35(20):40~42
- 8 李旭东,张振跃. 利用矩阵范数实现的公开水印技术. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(8):1857~1861
- 9 Tsai C F, Yang W Y. Real-time color image watermarking based on D-SVD scheme. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 48(12):289~297
- 10 张宪海, 杨永田. 基于DFT-SVD域抗几何攻击图像水印算法. 计算机工程, 2006, 32(18):120~122
- 11 Bao P, Ma X H. Image adaptive watermarking using wavelet domain singular value decomposition. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(1):96~102
- 12 Navas K A, Ajay M C, Lekshmi M, *et al.* DWT-DCT-SVD based watermarking. Proceedings of 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops, Bangalore, 2008: 271~274
- 13 朱少敏,刘建明. 基于Contourlet变换域的自适应量化索引调制数字图像水印算法. 光学学报,2009,29(6):1523~1529
- 14 Wang X Y, Zhao H. A novel synchronization invariant audio watermarking scheme based on DWT and DCT. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(12):4835~4840
- 15 王向阳,赵红,崔永瑞. 一种新的混合域自适应数字音频水印算法. 小型微型计算机系统, 2006, 27(2):316~319

【作者简介】



朱少敏,男,博士,国网北京市电力公司朝阳供电公司工程师,主要从事电力系统智能电网网络与信息安全、方式运行和新能源等方面的研究工作。



张志强,男,国网北京市电力公司朝阳供电公司工程师,主要从事电力系统变电运行、继电保护及其自动化等方面的研究工作。

(收稿日期:2013-08-01)

·简讯·

2013年第3季度通信业主要通信能力

指标名称	单位	本季末到达	比上年末新增
光缆线路长度	千米	16 543 077	1 737 370
其中:长途光缆线路长度	千米	896 938	28 495
固定长途电话交换机容量	万路端	1 452	-156.9
局用交换机容量	万门	42 166.4	-1 740.1
其中:接入网设备容量	万门	23 043.9	-358.1
移动电话交换机容量	万户	194 383.7	11 513.9
互联网宽带接入端口	万个	35 485.4	8 649.9

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)