

抗几何攻击的强鲁棒性全息水印研究

周中原¹, 孙刘杰¹, 王文举¹, 范冬梅², 万其卫²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海宝钢包装股份有限公司, 上海 200093)

摘要: **目的** 寻找一种能够抵抗常见几何攻击的安全的水印算法。**方法** 通过分析常见的水印算法, 发现傅里叶-梅林变换域水印能够较好地满足抵抗常见几何攻击的需求。对水印图像进行双随机相位全息加密, 通过密钥保障水印的安全性, 通过把加密的水印嵌入到傅里叶-梅林变换域的方法, 设计对比试验, 研究含有水印的图像在平移、缩放、旋转、中值滤波、高斯噪声、椒盐噪声、压缩、打印扫描、打印拍摄攻击下提取水印质量的影响。**结果** 水印能够抵抗常见的几何攻击, 特别对平移、缩放、旋转组合几何攻击、打印扫描和打印拍摄有很好的效果。**结论** 基于傅里叶-梅林变换的全息水印算法具有很好的鲁棒性, 能够抵抗常见的几何攻击; 具有很好的安全性, 没有密钥不能对水印进行检测和去除。

关键词: 傅里叶-梅林变换; 全息; 数字水印

中图分类号: TS853⁺.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)05-0131-06

Holographic Digital Watermarking Algorithm against Geometric Attacks with Strong Robustness

ZHOU Zhong-yuan¹, SUN Liu-jie¹, WANG Wen-ju¹, FAN Dong-mei², WAN Qi-wei²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Baosteel Packaging Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: **Objective** To find a digital watermarking algorithm against geometric attacks and of security. **Methods** By analyzing commonly used algorithms, it was found that the algorithm based on Fourier-Mellin transform was able to meet the demands of resisting geometric attacks and that the double random phase encrypted holographic technology was able to meet the demands of security. Using the method of embedding holographic watermark image into Fourier-Mellin domain, the influences of rotation, scale, translation, median filter, Gaussian noise, salt and pepper noise, JPEG compression, print-scan and print-shooting on the quality of imaging were investigated by experiments. **Results** The results showed that the holographic digital watermarking technology based on Fourier-Mellin transform could resist geometric attacks, especially the images taken by a phone or scanner and image attacks by combinations of geometric attacks such as rotation scale and translation. **Conclusion** The holographic digital watermarking technology based on Fourier-Mellin transform is of both robustness and security.

KEY WORDS: Fourier-Mellin transform; holographic; digital watermarking

随着互联网的发展,数字产品的传播变得越来越容易,数字作品的版权保护越来越受到重视。数字水印技术是数字作品版权保护的重要途径,通过在数字

作品中嵌入标识,使授权方可以获得数字作品中的内容,阻止非法的获取和传播,从而实现版权保护的功能。

收稿日期: 2013-09-05

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(13ZZ111); 国家新闻出版总署数字印刷工程研究中心开放基金项目(10-00-309-000)

作者简介: 周中原(1990—),男,山东菏泽人,上海理工大学硕士生,主攻图像处理和数字水印。

通讯作者: 孙刘杰(1965—),男,安徽怀宁人,博士,上海理工大学教授,主要研究方向为图像处理和数字水印。

抗几何攻击的数字水印算法是目前研究的热点和难点之一,一个不可察觉的、微弱的几何攻击就能使水印算法失效,原因是几何攻击破坏了载体图像和水印图像之间的同步性^[1]。通过研究发现,傅里叶-梅林变换具有抵抗常见几何攻击的性质。如果知道水印的嵌入方法,则任何人都能提取、检测、去除水印,不具备安全性。如果引入双随机相位全息加密技术,则只有密钥所有者才能检测水印。傅里叶-梅林变换和双随机相位加密的结合使得水印既能抵抗常见的几何攻击,又能保障水印的安全性。

1 傅里叶-梅林变换

1.1 傅里叶-梅林变换的原理

由于产生的频谱具有平移、缩放、旋转(RST)的不变性,因而傅里叶-梅林变换在图像处理中具有很广泛的应用。傅里叶变换具有平移不变性,经过极坐标转换,它能把缩放和旋转的偏差转换为可以测量的平移量。第2次的快速傅里叶变换,被称作梅林变换,能够生成一个具有平移、缩放、旋转不变性的变换空间图像。傅里叶-梅林变换的原理见图1。

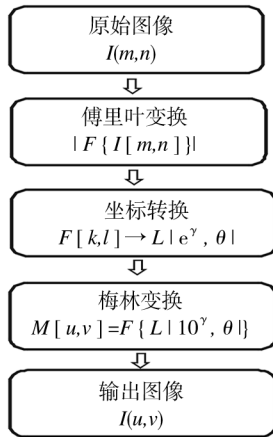


图1 傅里叶-梅林变换的原理

Fig. 1 Block diagram of the Fourier-Mellin Transform

1.1.1 傅里叶变换

离散傅里叶变换(DFT)的计算公式:

$$|F\{I[m,n]\}| = |F\{k,l\}| = \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I[m,n] e^{-j(2\pi/M)(km)} e^{-j(2\pi/N)(ln)} \right|$$

通常使用快速傅里叶变换(FFT)来进行计算,以加快速度。

1.1.2 平面直角坐标系到极坐标系的转换

快速傅里叶变换被投影到极坐标系中,见图2。

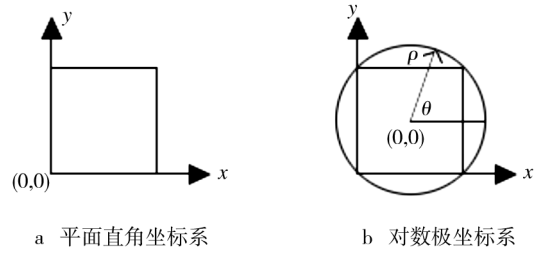


图2 平面直角坐标系到对数极坐标系的转换

Fig. 2 Transformation from rectangular to polar coordinates

直角坐标系使用 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 公式转换到极坐标系。

原点 (m_0, n_0) 应该设在图像的中心,以保证包括最多数目的像素。如果图像是由 $N \times N$ 的方阵组成,那么极坐标系的原点是:

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= N/2 \\ n_0 &= N/2 \end{aligned} \right\} \quad N \text{ 为偶数时}$$
$$\left. \begin{aligned} m_0 &= (N-1)/2 \\ n_0 &= (N-1)/2 \end{aligned} \right\} \quad N \text{ 为奇数时}$$

使用下面的公式计算最大采样半径:

$$\rho_{\max} = \min(m_0, n_0) \quad \text{内切圆时}$$
$$\rho_{\max} = \sqrt{m_0^2 + n_0^2} \quad \text{外接圆时}$$

式中 $\min$ 指取最小值。使用内切圆作为转换边界,落在圆外部的像素点会被忽略;使用外接圆作为转换边界,所有的像素点都会被采集,但是会采集到无用的像素点。文中将使用外接圆作为转换边界。

由于直角坐标系中的点不能与极坐标系中的点一一对应,因此需要计算差值。最常用的计算方法有3种:最近邻插值、双线性插值、双三次插值,文中将使用最近邻差值。

用于表示输入图像的极坐标 (ρ, θ) 与极坐标系下的极坐标 (r, θ) 的关系式为: $(\rho, \theta) = (e^\gamma, \theta)$

输入图像 $\text{image}_{\text{in}}(x_i, y_i)$ 与输出图像 $\text{image}_{\text{out}}(r_m, \theta_n)$ 计算公式为:

$$x_i = \text{round}(\rho_m * \cos(\theta_n) + m_0)$$
$$y_i = \text{round}(\rho_m * \sin(\theta_n) + n_0)$$

其中, $(\rho_m, \theta_m) = (e^{r_m}, \theta_m)$, image_{in} 是 $i \times j$ 的矩阵,而 $\text{image}_{\text{out}}$ 是 $m \times n$ 的矩阵。

1.1.3 梅林变换

通过梅林变换,缩放和旋转的偏差转换为可以测

量的平移量,使用具有旋转、缩放不变性的变换域图像来表示原始图像。梅林变换公式为:

$$M(u, v) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(x, y) x^{-ju-1} y^{-jv-1} dx dy; \quad \forall x, y > 0$$

通过转换成极坐标

$$M\{f(r)\} = \int_0^\infty f(r) r^{-ju-1} dr$$

其中 $r = e^\gamma, dr = e^\gamma d\gamma$

$$M\{f(e^\gamma)\} = \int_0^\infty f(e^\gamma) e^{-ju\gamma} d\gamma$$

上式是一个傅里叶变换^[2-3]。

1.2 RST 不变性原理

1.2.1 平移不变性

设 $f(x, y)$ 是一副图像, (a, b) 为 $f(x, y)$ 的平移量, 则平移后的图像为 $f(x+a, y+b)$ 。设 $f(x, y)$ 的傅里叶变换为 $F(u, v)$, 平移后的图像的傅里叶变换为 $F'(u, v) = \exp[-j2\pi(ua+vb)] * F(u, v)$ 。由此可以看出, 2 幅图像具有相同的傅里叶变换和不同的相位关系^[4], 而相位关系由两者之间的平移量 (a, b) 直接决定。平移对于傅里叶变换的相位有影响, 对于幅度没有影响, 所以对于图像的平移具有不变性。

1.2.2 缩放和旋转不变性

对图像进行缩放, 缩放因子为 λ , 则缩放后的图像为 $f(\lambda x, \lambda y)$, 傅里叶变换为 $\frac{1}{\lambda} F\left(\frac{u}{\lambda}, \frac{v}{\lambda}\right)$ 。由此可以看出, 缩放后图像的傅里叶变换幅度产生了变化。对图像进行旋转, 旋转角度为 φ , 则旋转后的图像为 $f(x\cos\varphi - y\sin\varphi, x\sin\varphi + y\cos\varphi)$, 傅里叶变换为 $F(u\cos\varphi - v\sin\varphi, u\sin\varphi + v\cos\varphi)$ 。由此可以看出, 旋转后图像的傅里叶变换幅度产生了变化。不具有缩放和旋转不变的性质。从平面直角坐标系转换到对数极坐标系中:

$$u = e^\rho \cos \theta, \quad v = e^\rho \sin \theta$$

其中 $\rho \in R, 0 < \theta < \pi$ 。

则缩放后的图像傅里叶变换可以表示为 $\frac{1}{\lambda} F(\rho - \lg \lambda, \theta)$, 则旋转后的图像傅里叶变换可以表示为 $F(\rho, \theta + \varphi)$ 。

这样就把旋转和缩放转化成对数极坐标系中 ρ 轴和 θ 轴上的平移了^[5]。对对数极坐标数据进行傅里叶变换, 根据 1.2.1 平移不变性的性质, 图像的缩放和旋转具有不变性, 最终得到 RST 不变域。

2 双随机相位全息加密技术

设待加密图像或数据为已归一化的 $f(x, y)$, 图像大小为 $M * N$ 。其中 (x, y) 为空域坐标。令 (ζ, η) 为频域坐标, $\varphi(x, y)$ 为双随机相位的加密图像。 $p(x, y)$ 和 $b(\zeta, \eta)$ 为均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的 2 个独立白噪声随机图像, 则双随机相位的加密图像为:

$$\varphi(x, y) = \{f(x, y) \exp[j2\pi p(x, y)]\} * h(x, y)$$

其中, $h(x, y)$ 是 $B(\zeta, \eta) = \exp[j2\pi b(\zeta, \eta)]$ 的脉冲响应, $*$ 为卷积运算符号。

加密图像的解密过程是加密的逆过程, 即将加密图像进行傅里叶变化后乘以 $\exp[-j2\pi b(\zeta, \eta)]$, 再进行逆傅里叶变换后乘以 $\exp[-j2\pi p(x, y)]$, 就可以得到原始图像 $f(x, y)$ 。理论证明 $\varphi(x, y)$ 是一个白噪声图像, 其均值为 0, 方差为:

$$\sigma_\phi^2 = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |f(u, v)|^2 \right]^{[6-11]}$$

双随机相位全息加密技术能够保证水印的安全性, 防止非法检测和去除。全息技术能够使图像在部分被损坏的情况下, 仍能提取完整的水印信息, 增加水印的鲁棒性。

3 水印的嵌入和提取技术

3.1 数字水印的嵌入技术

1) 读入 RGB 图像, 分离出 B 分量, 对分量 $I_1(m, n)$ 进行傅里叶-梅林变换, 得到 $FMT\{I_1(m, n)\}$ 。

2) 对水印图像 $w_1(x, y)$ 进行双随机相位全息加密, 得到 $H\{w_1(x, y)\}$, 再进行傅里叶-梅林变换, 得到 $FMT\{H\{w_1(x, y)\}\}$ 。

3) 通过加权来嵌入水印, 嵌入系数为 k , 加权公式如下:

$$J = FMT\{I(m, n)\} + k \times FMT\{H\{w(x, y)\}\}。$$

4) 对 J 进行逆傅里叶-梅林变换, 得到 $iFMT\{J\}$ ^[12-15]。

5) 合并通道, 得到含有水印的 RGB 图像。

3.2 数字水印的提取技术

1) 读入待检测的 RGB 图像, 分离出 B 分量, 对分量 $I_2(m, n)$ 进行傅里叶-梅林变换, 得到 $FMT\{I_2(m, n)\}$ 。

2) 用 $FMT\{I_2(m,n)\}$ 减去原来的 $FMT\{I_1(m,n)\}$, 并除以嵌入系数 k , 得到 H 。

3) 对 H 进行逆傅里叶-梅林变换得到 $iFMT\{H\}$ 。

4) 对 $iFMT\{H\}$ 进行双随机相位解密, 得到 $w_2(x,y)$ 。

4 实验结果与分析

4.1 峰值信噪比

峰值信噪比 (PSNR) 是一个表示信号最大可能功率和影响它表示精度的破坏性噪声功率比值的工程术语。由于许多信号都有非常宽的动态范围, 因此峰值信噪比常用单位分贝来表示。

峰值信噪比经常用作图像压缩等领域中信号重建质量的测量方法, 它常简单地通过均方差 (MSE) 进行定义。2 个 $m \times n$ 单色图像 I 和 K , 如果一个和另外一个的噪声近似, 那么它们的均方差定义为:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i,j) - K(i,j) \|^2$$

峰值信噪比定义为:

$$PSNR = 10\lg\left(\frac{MAX_I^2}{MSE}\right) = 20\lg\left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}}\right)$$

式中: MAX_I 为图像点颜色的最大数值, 如果每个采样点用 8 位表示, 那么就是 255。更为通用的表示是: 如果每个采样点用 B 位线性脉冲编码调制表示, 那么 MAX_I 就是 $2^B - 1$ 。

对于每点有 RGB 3 个值的彩色图像来说, 峰值信噪比的定义类似, 只是均方差为所有方差之和除以图像尺寸再除以 3。

从仿真结果可以看出, PSNR 满足视觉可以容忍的 20 dB 以上。PSNR 值越大, 图像的质量越好, 说明水印具有较好的不可见性; 能够较清晰地提取出水印, 与原始水印图像相似。

4.2 水印算法的鲁棒性仿真实验

为了验证算法提取水印的鲁棒性, 对含有水印的图像进行平移、缩放、旋转、椒盐噪声、中值滤波、高斯噪声、JPEG 压缩等几种常见的攻击做了相关的性能测试^[16]。

实验结果表明, 由图 4a—d 的旋转攻击可以看出, 算法能够抵抗任何角度的旋转攻击; 由图 4e—f 的缩放攻击可以看出算法能够抵抗一定范围的缩放

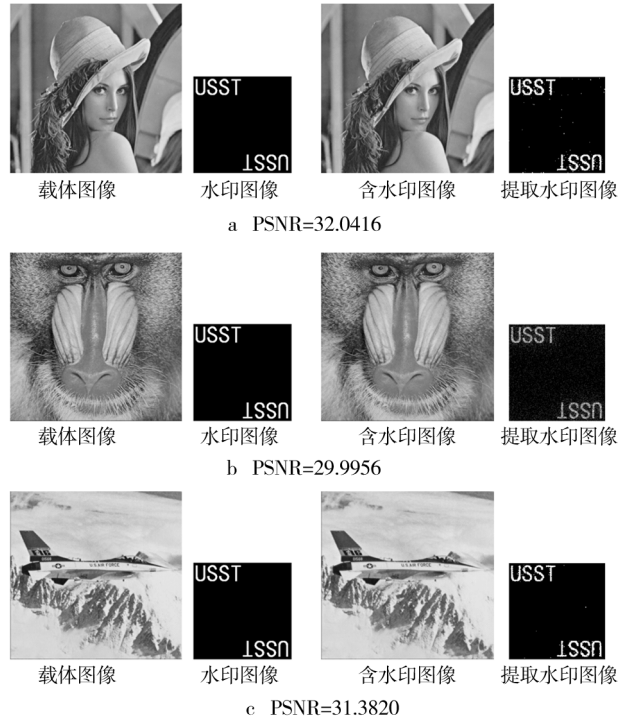
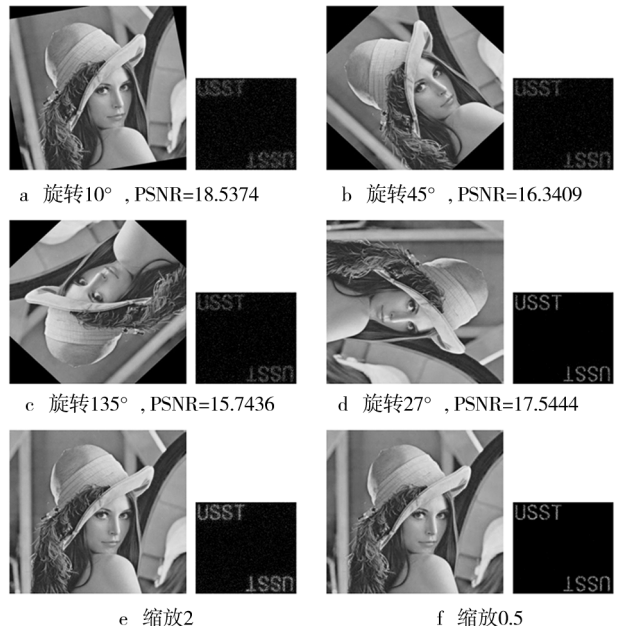


图 3 水印嵌入与提取仿真结果

Fig. 3 The simulating results of embedding and extracting watermarks

攻击; 由图 4g—h 的平移攻击可以看出算法能够抵抗一定范围的平移攻击; 由图 4i—l 可以看出算法能够抵抗常见的滤波、噪声、压缩攻击; 由图 4m 可以看出算法能够抵抗打印拍摄, 一般的水印算法不能通过手机拍摄来提取水印; 由图 4n 可以看出算法能够抵抗打印扫描; 由图 4o—r 的组合攻击可以看出, 算法能够抵抗平移、缩放、旋转的组合攻击。进行上述攻击



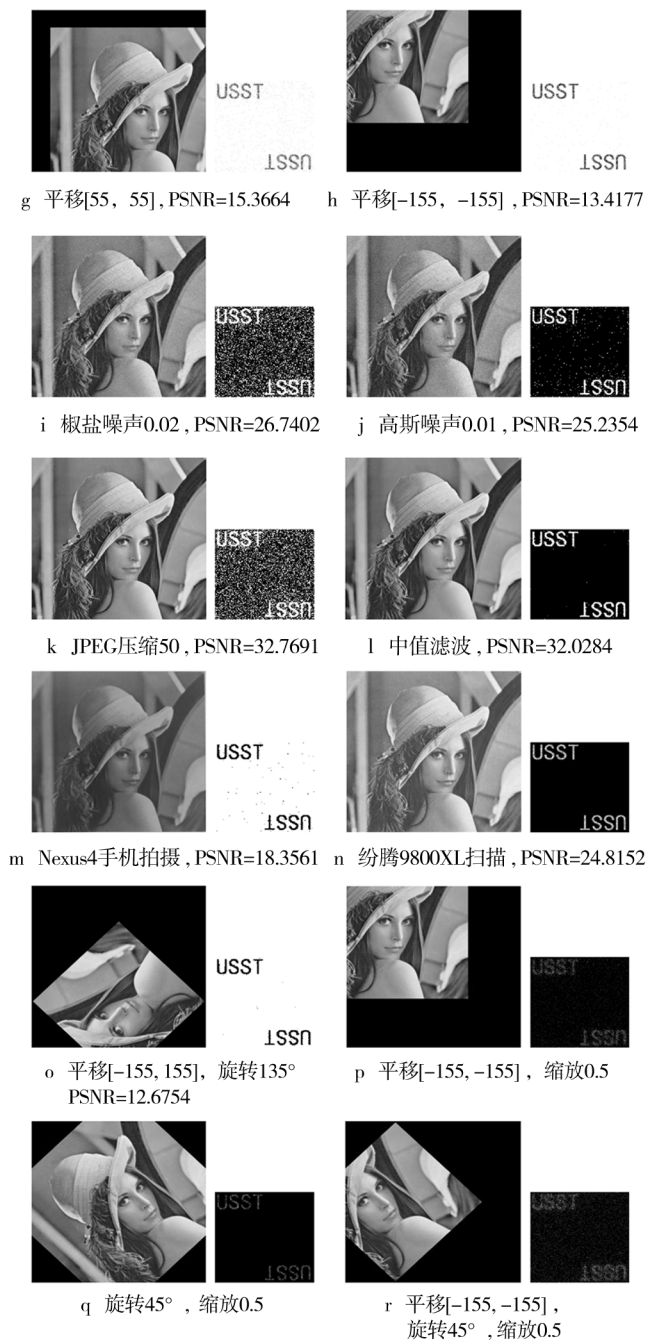


图4 水印鲁棒性仿真结果

Fig.4 The simulating results of watermark robustness

之后,能够提取出清晰的水印,说明了该水印算法具有较强的鲁棒性。

5 结语

研究了傅里叶-梅林变换和全息水印技术,通过两者的结合,提出了基于傅里叶-梅林变换的全

息水印算法。算法具有较强的不可见性,对常见的平移、缩放、旋转、椒盐噪声、高斯噪声、中值滤波、压缩攻击具有较强的鲁棒性。尤其是对手机拍摄的图像和经过平移、缩放、旋转组合攻击后的图像,同样能够提取出水印,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 李雷达,郭宝龙,武晓钥. 一种新的空域抗几何攻击图像水印算法[J]. 自动化学报,2008,34(10):1235—1242.
LI Lei-da, GUO Bao-long, WU Xiao-yue. A New Spatial Domain Image Watermarking Scheme Existing Geometric Attacks[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(10):1235—1242.
- [2] MOUTON C J. Processing of on Board Images to Assist Automatic Forward Motion Compensation for Micro-satellites[D]. Cape Town: University of Stellenbosch, 2003:29—36.
- [3] LIN C Y, WU M, BLOOM J A, et al. Rotation, Scale, and Translation Resilient Watermarking for Images[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2001, 10(5):767—782.
- [4] 马金福,薛弘晔. 基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准算法及性能研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(11):134—136.
MA Jin-fu, XUE Hong-ye. Image Registration Algorithm and Efficiency Research Based on Fourier-Mellin[J]. Computer & Digital Engineering, 2008, 36(11):134—136.
- [5] 孙刚,谢俊元. 一种基于 Fourier-Mellin 变换的数字水印的研究[J]. 计算机工程, 2004, 30(9):152—153.
SUN Gang, XIE Jun-yuan. Research on a Watermark Based on the Fourier-Mellin Transform[J]. Computer Engineering, 2004, 30(9):152—153.
- [6] 孙刘杰,庄松林. 双随机相位加密全息标识防伪技术研究[J]. 光学学报, 2007, 27(1):31—34.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Anti-fake Technique by Double Random Phase Encrypted Holographic Mark[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1):31—34.
- [7] 孙刘杰,庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4):61—64.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on Inline Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4):61—64.
- [8] 李孟涛,孙刘杰,李晨璐,等. 基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1):108—112.
LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LI Chen-lu, et al. Research on Fourier Encryption Printing Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1):108—112.
- [9] 周中原,孙刘杰,唐波,等. 一种抗旋转的全息水印算法

- [J]. 包装工程, 2013, 34(19): 95—100.
- ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, TANG Bo, et al. An Anti-rotation Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 95—100.
- [10] 孙刘杰, 王子煜. 一种新的安全鲁棒全息数字水印技术[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 106—109.
- SUN Liu-jie, WANG Zi-yu. A New Holographic Digital Watermarking Technology with Good Security and Robustness[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 106—109.
- [11] 王子煜, 孙刘杰, 李孟涛. 强鲁棒性 QR 码水印技术[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 84—87.
- WANG Zi-yu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. QR Code Watermark Technology with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 84—87.
- [12] RUANAIDH J J K, PUN T. Rotation, Scale and Translation Invariant Spread Spectrum Digital Image Watermarking[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 303—317.
- [13] ZUO H, LI X, WU O, et al. Image Spam Filtering Using Fourier-Mellin Invariant Features[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009: 849—852.
- [14] ZHANG H, SHU H Z, HAIGRON P, et al. Construction of a Complete Set of Orthogonal Fourier-Mellin Moment Invariants for Pattern Recognition Applications[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(1): 38—44.
- [15] BIGOT J, GAMBOA F, VIMOND M. Estimation of Translation, Rotation, and Scaling between Noisy Images Using the Fourier-Mellin Transform[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 614—645.
- [16] 李孟涛, 孙刘杰, 刘真. 变换域加密全息水印算法[J]. 包装工程, 2011, 32(15): 22—24.
- LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LIU Zhen. Encrypted Holographic Watermarking Algorithm Based on Transform Domain[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15): 22—24.
-
- (上接第 30 页)
- [5] 金潇明. 果蔬包装贮藏分析与隔热计算[J]. 包装工程, 1990, 11(1): 25—28.
- JIN Xiao-ming. Analysis of Packed Fruits and Vegetables in Storage and the Calculation of Their Thermal-insulation[J]. Packaging Engineering, 1990, 11(1): 25—28.
- [6] 张芸, 钱静. 可降解凝胶蓄冷剂的制备及性能分析[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 40—44.
- ZHANG Yun, QIAN Jing. Preparation and Performance Analysis of Biodegradable Gelatinous Refrigerant[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 40—44.
- [7] 张亮, 晏华, 余荣升, 等. 相变材料的研究进展及其在建筑领域的应用综述[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(1): 69—73.
- ZHANG Liang, YAN Hua, YU Rong-sheng, et al. A Review of Phase Change Materials: Development and Application in Building Energy Saving[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(1): 69—73.
- [8] BURGESS G. Practical Thermal Resistance and Ice Requirement Calculations for Insulating Packages[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(2): 75—80.
- [9] STAVISH L J. Designing Insulated Packaging for Perishable in Vivo Diagnostics[J]. Medical Device and Diagnostic Industry, 1984, 6(18): 105—108.
- [10] QIAN J. Mathematical Models for Insulating Packages and Insulating Packaging Solutions[D]. USA: University of Memphis, 2009.
- [11] 郭晓娟, 钱静. 基于 ANSYS 保温包装球壳模型的建立[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 43—48.
- GUO Xiao-juan, QIAN Jing. Spherical Shell Models for Insulating Packages Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 43—48.
- [12] 赵艳冰, 钱静. 基于 ANSYS 的温控包装圆柱体模型的建立[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 18—22.
- ZHAO Yan-bing, QIAN Jing. Establishment of Cylinder Models for Temperature Control Packages Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 18—22.
- [13] MATSUNAGA K, BURGESS G, LOCKHART H. Two Methods for Calculating the Amount of Refrigerant Required for Cyclic Temperature Testing of Insulated Packages[J]. Package Technology and Science, 2007, 20(2): 113—123.
- [14] 高斯, 钱静. 保温包装整体设计及结构分析[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 51—53.
- GAO Si, QIAN Jing. Overall Design of Insulation Packaging and Structural Analysis[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 51—53.
- [15] KREITH F. Principles of Heat Transfer[M]. 3rd. New York: Intext Press, 1973.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- YANG Shi-ming, TAO Wen-shuan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [17] YANG S M, ZHANG Z Z. An Experimental Study of Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Cylinder in High Rayleigh Number Laminar and Turbulent Region[C]//Hewitt G F. Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference. Brighton, 1994, 7: 185—189.