

基于图像校正的抗几何变换全息水印算法

白韬韬, 刘真, 卢鹏

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出了一种基于图像校正的抗几何变换全息水印算法。**方法** 在水印嵌入时,将原始二值水印图像,利用共轭对称延拓傅里叶计算全息方法生成全息水印,并嵌入在原始图像小波变换的对角线高频系数中,逆变换得到含水印图像。在含水印图像的DFT域中嵌入模版信息,在水印提取时,首先利用模版信息对图像进行校正,然后提取水印信息。**结果** 该算法保留了全息水印的优良特性,结合了模版匹配校正技术,可以有效抵抗滤波、噪声、裁切、JPEG压缩、旋转、等比例缩放及其组合攻击。**结论** 该算法在实际应用中能有效抵抗几何攻击,可以应用于数字图像的版权保护中。

关键词: 版权保护; 几何攻击; 全息技术; 模版匹配

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)19-0103-06

Holographic Watermarking Algorithm Resistant to Geometric Attack Based on Image Correction

BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Objective To propose a holographic watermarking algorithm resistant to geometric attack based on image correction. **Methods** In the phase of watermark embedding, a binary watermark was converted to a hologram using the computer generated holography by the conjugate-symmetric extension, and the hologram was embedded in the high-frequency coefficients of the original image decomposed by DWT transformation. The template was then inserted into the DFT domain of the watermarked image. During extraction of the watermark, the image was first corrected using the template information and then the information was extracted. **Results** The proposed algorithm combined the use of holography and the image correction method of template matching. It could effectively resist low-pass filtering, noise, cropping, JPEG compression, rotation, scaling attacks and hybrid attack of rotation and scaling. **Conclusion** The algorithm proposed in this paper could efficiently resist geometric attacks in practice and could be used in copyright protection.

KEY WORDS: copyright protection; geometric attack; holography; template matching

随着互联网技术的飞速发展,数字产品的获取、使用和传播变得越来越简单。在用户方便获得数字产品的同时,也对数字产品版权保护带来了巨大挑战。未授权的使用传播使得版权人的权益受到了严重侵害。由于版权保护问题日趋严重,学术界提出了利用数字水印^[1-3]技术来解决版权保护问题。

抗几何攻击的图像水印技术一直是数字水印领域的难点和重点^[4-8]。基于二值水印的抗几何变换水印技术一直是众多学者的研究热点。但是,由于全息水印信息量大,导致大多数基于二值水印的抗几何攻击算法无法使用全息水印,由此现阶段基于全息水印的抗几何攻击水印算法较少,从而限制了全息技术在

收稿日期: 2014-03-31

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302)

作者简介: 白韬韬(1989—),男,辽宁锦州人,上海理工大学硕士研究生,主攻信息光学及数字水印技术。

数字水印领域中的应用。2002年, Takai等^[9]将全息技术引入数字水印领域, 将物光与参考光干涉得到的全息图像作为水印图像嵌入在载体图像中。全息图像具有不可撕毁性, 其抵抗剪切攻击的能力很强。但由于选用了空域叠加方式嵌入水印, 使得图像的质量明显下降。此后, 许多学者都对全息水印进行了研究^[10-13]。2005年, Kim等^[14]将全息图像作为水印嵌入图像, 利用几何变换的干涉全息图像经过傅里叶变换后原始图像也进行了相应几何变换的原理来校正图像, 并提取水印信息, 但该算法选择的二值水印图像有限且无意义; 2007年, LIU等^[15]将生成的计算全息水印进行逆对数极坐标变换, 在空域中与原始图像叠加嵌入水印, 提取水印时, 再将图像变换到不变域来提取水印信息。这使得算法可以抵抗几何攻击, 但含水印图像可以清晰地看到失真, 并且提取的水印信息不清晰; 2009年^[16], HUANG等提出了共轭对称延拓傅里叶计算全息方法, 并将其应用到数字水印当中^[17],

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} 0 & x = 0, \text{ or } y = 0, \text{ or } x = M/2 \\ \varphi(x, y) & x = 1, 2, \dots, M/2 - 1; y = 1, 2, \dots, N - 1 \\ \varphi^*(M - x, N - y) & x = M/2 + 1, \dots, M - 1; y = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, *表示对复数作共轭运算, $\varphi(x, y)$ 经过共轭对称延拓计算后得到的复数图像为 $\Phi(x, y)$, 对 $\Phi(x, y)$ 做二维离散傅里叶变换, 得到实值的全息图像。设得到的全息图像为 $H(x, y)$, 则有:

$$H(x, y) = F\{\Phi(x, y)\} \quad (2)$$

式中, F 表示傅里叶变换。此实数图像记录了复数图像的振幅和相位信息。

2 图像校正方法

2.1 模版嵌入

基于图像校正的重同步水印信息的数字水印算法已经得到了学者的关注。其中, 离散傅里叶变换域具有的良好性质, 使其受到了广大学者的青睐。由傅里叶频率域的旋转特性和尺度特性可知, 当空域图像旋转时, 频域图像也旋转相应的角度; 当空域图像尺度变化 ρ 倍时, 频域图像尺度相应变化为原来尺寸的 $1/\rho$ 。正是由于有这样的特性, 可以选择在图像的频域中嵌入模版信息^[8], 以便对几何攻击后的图像进行校正。具体步骤如下所述。

但提出的算法抵抗几何攻击性能较差。

基于上述原因, 对抗几何攻击的全息水印进行了研究。针对目前抗几何攻击全息水印无法平衡鲁棒性和不可见性这一问题, 提出了基于图像校正的抗几何变换全息水印算法, 将受到几何攻击的图像进行校正, 在校正后的图像中检测并提取出水印信息。

1 共轭对称延拓傅里叶计算全息

设原始实值水印图像为已经归一化的图像 $f(x, y)$, 尺寸为 m 像素 \times n 像素。利用共轭对称延拓傅里叶计算全息方法, 生成全息水印图像, 待记录的复数图像 $\varphi(x, y) = f(x, y) \exp[jp(x, y)]$, 其中, 相位是 $[-\pi, \pi]$ 范围内均匀分布的随机数。

对复数图像进行共轭对称延拓计算, 得到尺寸为 M 像素 \times N 像素的复数图像, 其中, $M = 2 \times (m + 1)$, $N = n + 1$, 见式(1):

1) 在 512 像素 \times 512 像素的图像周边, 填充像素值为 0 的像素, 将其扩充为 1024 像素 \times 1024 像素的图像。

2) 对填充的图像进行二维离散傅里叶变换, 取其幅度谱分量, 在中低频区域嵌入 28 个模版点, 分布在以原点为中心的 45° 和 135° 倾角上。嵌入模版的位置见图 1。

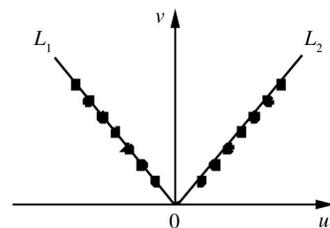


图1 嵌入模版的位置

Fig.1 Position of template insertion

图 1 所示为频率域的上半面模版嵌入情况, 在 45° 和 135° 方向 (L_1 和 L_2 方向) 分别嵌入 7 个模版点。由于频率域是中心对称的, 所以对下半面的对应位置也作相应的修改。

3) 将模版点位置像素值修改为以其为中心 $n \times n$ 方形邻域的局部极大值, 该点即为局部极大值点。

局部极大值的定义为:

$$v_{\max} = \alpha \times a_{vg} + \beta \times s_{sd} \quad (3)$$

式中, v_{\max} 为邻域极大值; a_{vg} 为方形邻域的均值; s_{sd} 为方形邻域的标准差; α, β 为权重参数。

4) 将得到的频域图像进行二维离散傅里叶逆变换, 得到嵌入模版后的空域图像。

2.2 模版检测及图像校正

由于空域图像的旋转、缩放与其频域图像的旋转、缩放有对应关系, 因此, 只要在受到几何攻击的图像频域中检测到相关的旋转角度和缩放比例参数, 即可得到空域图像所受几何攻击的参数。在文献[8]中, 选择在全局搜寻满足条件的极值点进行匹配, 使得算法的搜索范围太广, 效率较低。这里, 首先利用 hough 变换估计出图像旋转的大致角度, 再在得到的角度基础上, 对其附近 $\pm 2^\circ$ 区域内搜索待匹配的极值点信息。具体步骤除利用 hough 变换将匹配点搜索范围缩小外, 与文献[8]基本相同。

1) 将得到的图像扩充为 1024 像素 \times 1024 像素。

2) 利用 hough 变换对扩充后的图像进行边缘检测, 得到其旋转的角度, 并分别加上 45° 和 135° 作为估计值, 以缩小匹配范围。

3) 对图像作二维离散傅里叶变换, 得到其频域中的图像。在频域上半面估计值的 $\pm 2^\circ$ 范围内, 利用 $m \times n$ 大小的模板 ($m < n$) 搜索极大值点, 将区域平均划分为 4 个扇形, 每个扇形的顶角为 1° , 并将极大值点归入相应的扇形区域。

4) 在每个扇形区域中, 搜索比例系数 K 值, 使得至少有 N 个局部极大值点满足 $|r'_{ij} - Kr_{ij}| < T_H$ 。其中, K 的范围是 0.5~2, r'_{ij} 是搜索到的局部极值点与中心点的半径, r_{ij} 是原对应模版点到中心点的半径, T_H 为阈值。

5) 计算左、右侧每个扇型区域内匹配线上各点的角度均值和每条匹配线的比例系数。并找出满足 $|A_l - A_r - 90^\circ| < T_{H1}, |K_l - K_r| < T_{H2}$ 条件的匹配点集, 形成匹配线对。其中, A_l 和 A_r 为可能与左、右侧模版线匹配的匹配线角度, K_l 和 K_r 为对应左、右匹配线的比例系数, T_{H1} 和 T_{H2} 为阈值。

6) 通过上述步骤, 得到可能匹配的匹配点集合, 坐标记为 (x_j^i, y_j^i) , 相应模版点的坐标记为 (x_j^i, y_j^i) 。其中, $i=1$ 或 2, 分别表示左侧或右侧的模版(匹配)线;

$j=1, 2, \dots, 7$, 表示模版(匹配)点。

7) 对于每个模版点和与其对应的匹配点, 总可能找到这样的 a, b, c, d 等 4 个参数, 使得 $T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 。根据如下公式计算出相应匹配线对的变换矩阵 $[A_1 \ A_2]^T$, 假设每条匹配线有 1 个匹配点。

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & y_1^1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^1 & y_1^2 & \vdots & \vdots \\ x_1^2 & y_1^2 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^2 & y_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1^1 & y_1^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & x_1^1 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & x_2^2 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & x_1^2 & y_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 \\ \vdots \\ x_1^2 \\ x_1^2 \\ \vdots \\ x_1^2 \\ y_1^1 \\ \vdots \\ y_1^1 \\ y_1^2 \\ \vdots \\ y_1^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以写为:

$$NA = M \text{ 或 } \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

8) 计算所有匹配线对的均方误差 MSE:

$$MSE = \frac{1}{n} (\|N_1 \cdot A_1 - M_1\|^2 + \|N_2 \cdot A_2 - M_2\|^2) \quad (6)$$

MSE 得到最小值时即得到最终的匹配线对, 对应的 T 即为频率域中的变换矩阵。则空域校正矩阵为 $T' = (T^T)^{-1}$, 利用校正矩阵将受到几何攻击的图像进行校正。

3 水印嵌入和提取

3.1 水印嵌入

将模版信息嵌入在图像 DFT 域频谱图的低频部分, 将全息水印嵌入在原始图像一级小波变换的对角线高频系数中, 嵌入方式选择了高频系数与水印图像加权相加的方法。这样, 模版信息与全息水印信息分属不同的频带, 互不影响, 从而保证了算法的鲁棒性。具体步骤如下所述。

1) 将 127 像素 × 255 像素的二值水印图像利用前述方法生成全息水印图像 w , 尺寸为 256 像素 × 256 像素。

2) 将 512 像素 × 512 像素的原始图像进行离散小波变换, 取其对角线高频信息 cd_1 , 利用公式(6)完成水印信息的嵌入, 并对得到的系数进行逆小波变换, 得到含水印图像。

$$cd_1(i,j) = cd_1(i,j) + q \times w(i,j) \quad (7)$$

式中, q 为加权系数, 即嵌入强度。

3) 利用 2.1 的方法, 在图像中嵌入模版信息。其中, $n=21, \alpha=20, \beta=5$ 。

3.2 水印提取

水印的提取过程是水印嵌入过程的逆过程。具体步骤如下:

1) 将受到几何攻击的图像利用 2.2 的方法进行校正。其中, $m=10, N=4, T_{H1}=0.002, T_{H11}=0.2, T_{H12}=0.02$ 。

2) 将校正后的图像黑边裁掉, 取得校正后的含水印图像。

3) 对其作离散小波变换, 得到对角线高频信息 cd_1' 。

4) 对对角线高频信息作离散傅里叶变换, 得到提取出的水印图像。

4 仿真实验及分析

利用 Matlab 编程进行仿真实验, 采用 512 像素 × 512 像素的 8 bit 灰度图像 "lena" 作为原始图像, 见图 2a。采用 127 像素 × 255 像素的带有 USST 字样的二值图像作为原始水印信息, 见图 2b。图 3a 和图 3b 分别为含水印图像和提取出的水印, 嵌入强度 $q=0.2$ 。含水印图像与原始图像的 PSNR 值为 39.8540, 说明原始图像与含水印图像有很高的相似度, 该算法有很强的不可见性。从图 2b 中可以看出, 提取出的水印信息清晰度也很高, 可以清楚地看到 USST 字样(提取的水印均未经二值化处理, 下同)。

为了验证本算法的鲁棒性, 分别对含水印图像进行了旋转攻击、等比例缩放攻击、JPEG 压缩攻击、旋转和缩放混合攻击、裁切攻击, 以及 JPEG 压缩、旋转和缩放混合攻击。在实验中, 图像进行旋转、缩放的插值方式均为实际应用中常用的 "bilinear" 双线性插值



图2 原始图像和二值水印图 Fig.2 Original image and binary watermark



图3 含水印图像和提取的水印 Fig.3 Watermarked image and extracted watermark



图4 不同攻击实验结果 Fig.4 Experimental results of different attacks

从图4a—e可以看出,该算法对旋转和等比例缩放及其混合攻击有很强的抵抗能力,提取出的全息水印经傅里叶变换得到的图像清晰可辨认。这是因为模版信息嵌入在图像的低频部分,而全息水印嵌入在图像的高频部分,两者互不影响,当受到几何攻击时,低频的模版可以有效地进行匹配校正,高频的水印信息即可清晰提取;从图4f—i可以看出,该算法对滤波、加性噪声和乘性噪声均有很强的抵抗能力。这是因为全息图像有很高的信息冗余性,使得其有很强抵抗噪声和滤波攻击的能力;从图4j和图4k可以看出,该算法对裁切和JPEG压缩攻击也有一定的抵抗能力;从图4l可以看出,图像受到JPEG压缩、旋转和等比例缩放的混合攻击,依然可以有效校正图像并提取出清晰的水印。由此可见,该算法可以在实际应用中有效抵抗旋转缩放攻击。

5 结语

提出了一种基于图像校正的抗几何变换全息水印算法。以二值水印的全息图作为水印信息嵌入到原始图像的高频信息中,并将用于几何校正的模版信息嵌入到图像的低频部分。算法结合了全息水印的优势,以及模版匹配技术可以对几何攻击后的图像进行有效校正这一特性,并利用 hough 变换首先检测出图像的大致旋转角度,从而大大减小了模版匹配的范围,提高了匹配效率。实验结果表明:该算法不仅可以在实际应用中有效抵抗旋转、等比例缩放及其组合攻击,对裁切、噪声、滤波攻击均有很强的鲁棒性,而且还对 JPEG 压缩攻击有一定的抵抗能力,实际应用性强。

参考文献:

- [1] SU Qing-tang, NIU Yu-gang, WANG Gang, et al. Color Image Blind Watermarking Scheme Based on QR Decomposition[J]. Signal Processing, 2014, 94(1): 219—235.
- [2] PAPAKOSTAS G A, TSOUGENIS E D, KOULOURIOTIS D E. Moment-based Local Image Watermarking via Genetic Optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 227: 222—236.
- [3] 白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于 QR 码的抗几何攻击数字水印[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 113—116.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Based on QR Code[J]. Package Engineering, 2013, 34(11): 113—116.
- [4] CHEN Chun-hung, TANG Yuan-liang, WANG Chi-peng, et al. A Robust Watermarking Algorithm Based on Salient Image Features[J]. Optik, 2014, 125(3): 1134—1140.
- [5] YUAN Xiao-chen, PUN Chi-man, Chen C L. Geometric Invariant Watermarking by Local Zernike Moments of Binary Image Patches[J]. Signal Processing, 2013, 93(7): 2087—2095.
- [6] SU Po-chi, CHANG Yu-chuan, WU Ching-yu. Geometrically Resilient Digital Image Watermarking by Using Interest Point Extraction and Extended Pilot Signals[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 8(12): 1897—1908.
- [7] 卢鹏, 刘真. 基于归一化的全息水印技术[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 115—118.
LU Peng, LIU Zhen. Holographic Watermark Technology Based on Image Normalization[J]. Package Engineering, 2013, 34(1): 115—118.
- [8] KANG Xian-gui, HUANG Ji-wu, SHI Yun, et al. A DWT-DFT Composite Watermarking Scheme Robust to Both Affine Transform and JPEG Compression[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 776—786.
- [9] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865—873.
- [10] 孙刘杰, 李孟涛. 基于 CMYK 颜色空间的光全息水印算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 27—32.
SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Study on Light Holographic Watermarking Algorithm Based on CMYK Color Space[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 27—32.
- [11] CHRISTOPHE M, FABIEN L, OLIVIER L. Gray Tone Image Watermarking with Complementary Computer Generated Holography[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15438—15451.
- [12] 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.
- [13] 谢勇, 冯起芹, 单武扬, 等. 数字全息水印在印刷半色调图像中的应用[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 101—105.
XIE Yong, FENG Qi-qin, SHAN Wu-yang, et al. Application of Digital Hologram Watermark in Printing Halftone Image[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 101—105.

- [14] KIM K T, CHOI J H, KIM S G. A Robust Digital Watermarking in Geometric Attacks[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005: 549—560.
- [15] LIU Min, YANG Guang-lin, XIE Hai-yan, et al. Computer-generated Hologram Watermarking Resilient to Rotation and Scaling[J]. Optical Engineering, 2007, 46(6): 1—3.
- [16] 黄素娟,王朔中,于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 952—958.
- HUANG Su-juan, WANG Shuo-zhong, YU Ying-jie. Computer Generated Holography Based on Fourier Transform Using Conjugate Symmetric Extension[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 952—958.
- [17] 黄素娟,王杜瑶,刘晓静,等. 基于小波变换的硬拷贝全息水印[J]. 光电子激光, 2011, 22(9): 1415—1420.
- HUANG Su-juan, WANG Du-yao, LIU Xiao-jing, et al. Hardcopy Hologram Watermarking Based on Discrete Wavelet Transform[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(9): 1415—1420.

(上接第54页)

可实现装备储存和运输过程的状态监测和管理,全程追溯装备储运过程,准确掌握装备质量状态,完善装备技术保障全寿命信息链,实现装备的精细化保障,促进高价值装备战斗力的生成。

参考文献:

- [1] 贾秀权,李鑫,胡斌. 大型复杂信息化装备军民一体化保障的研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(11): 25—27.
- JIA Xiu-quan, LI Xin, HU Bin. Research on Support System for Civil-military Integration of Heavy and Sophisticated Informatization Equipments[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(11): 25—27.
- [2] 李忠光,吴秀鹏,顾雪峰,等. 美军装备保障力量模块化研究及启示[J]. 军事交通学院学报, 2011, 13(8): 84—87.
- LI Zhong-guang, WU Xiu-peng, GU Xue-feng, et al. On Equipment Support Force Modularization of US Army and Its Enlightenment[J]. Journal of Military Transportation University, 2011, 13(8): 84—87.
- [3] 赵春宇,马伦,孔祥群,等. 信息化条件下装备维修保障技术发展现状及趋势[J]. 信息技术, 2012(1): 185—190.
- ZHAO Chun-yu, MA Lun, KONG Xiang-qun, et al. State of the Art and Trend for Development of Equipment Maintenance Support Technique under Informatization[J]. Information Technology, 2012(1): 185—190.
- [4] WU B F, CHEN Y H, YEH C H. Driving Behaviour-based Event Data Recorder[J]. Iet Intelligent Transport Systems, 2014, 8(4): 61—367.
- [5] GABAUER D, GABLER H. Comparison of Roadside Crash Injury Metrics Using Event Data Recorders[J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(2): 548—558.
- [6] 沈建华,杨艳琴,翟晓曙. MSP430系列16位超低功耗单片机实践与系统设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- SHEN Jian-hua, YANG Yan-qin, ZHAI Xiao-shu. MSP430 Family of Ultra-low-power 16-bit MCU and System Design Practice[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [7] MAMAGHANIAN H, KHALED N, ATIENZA D, et al. Compressed Sensing for Real-time Energy-efficient ECG Compression on Wireless Body Sensor Nodes[J]. Biomedical Engineering, 2011, 58(9): 2456—2466.
- [8] SAMPLE A P, YEAGER D J, POWLEDGE P S, et al. Design of an RFID-based Battery-free Programmable Sensing Platform[J]. Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2608—2615.
- [9] SHT1X Datasheet[Z]. Switzerland: Sensirion, 2011.
- [10] ANASTASI G, FARRUGGIA O, LORE G, et al. Monitoring High-quality Wine Production using Wireless Sensor Networks[C]// 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, 2009: 1—7.
- [11] ZHANG Min. Design of Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Network[C]// 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2013: 547—551.
- [12] ADXL345 Datasheet[Z]. USA: Analog Devices, 2010.
- [13] FUDICKAR S, KARTH C, MAHR P, et al. Fall-detection Simulator for Accelerometers with In-hardware Preprocessing [C]// Proceedings of the 5th International Conference on pervasive Technologies Related to Assistive Environments, 2012: 1—7.
- [14] 陈华友,盛昭瀚,刘春林. 调和平均的组合预测方法之性质研究[J]. 系统工程学报, 2004, 19(6): 620—624.
- CHEN Hua-you, SHENG Zhao-han, LIU Chun-lin. Research on Properties of Harmonic Means Combination Forecasting Method[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(6): 620—624.
- [15] 吕孙云,许银山,熊莹,等. 组合预测方法在需水预测中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011(5): 565—570.
- LYU Sun-yun, XU Yin-shan, XIONG Ying, et al. Combined Forecasting Method for Forecasting Water Demand[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011(5): 565—570.