

非均匀量化数字全息图及在信息隐藏中的应用

陈家祯 郑子华 连桂仁 叶锋

(福建师范大学数学与计算机学院, 福建 福州 350007)

摘要 提出一种采用非均匀量化思想编码傅里叶变换数字全息图的方法,并以均匀量化数字全息图作为对比,分析了所生成的数字全息图在量化噪声功率方面的改善情况。仿真结果表明,在编码位数相同的情况下,采用非均匀量化编码方案生成的数字全息图具有更低的量化噪声功率及更好的再现质量,作为水印信号使用时,在遭受同等强度高斯噪声或椒盐噪声干扰的情况下,从嵌有非均匀量化数字全息水印的载体图像中可以复原出更清晰的数字再现像。而在抗剪切、抗 JPEG 压缩等方面表现出与均匀量化全息水印相类似的稳健性。该方法可用于信息隐藏应用中对全息水印信号的预处理及全息图的数字化存贮、转换及处理等。

关键词 数字全息;非均匀量化;傅里叶变换;数字压扩

中图分类号 O438.1

OCIS 090.1760 090.1995 200.3050

文献标识码 A

Nonuniform Quantization Digital Holography and Its Application in Information Hiding

Chen Jiazhen Zheng Zihua Lian Guiren Ye Feng

(College of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University,
Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract A nonuniform quantization encoding method for Fourier transform digital holography is proposed. The generated digital holography in quantization noise power aspect has been analyzed and compared with the uniform quantization holography. The simulation results show that the nonuniform quantization method can bring lower quantization noise power and better quality of the reconstructed image under the condition of the same encoding bits. A clearer digital reconstructed image can be retrieved from the carrier image embedded with nonuniform quantization digital holographic watermark when suffered from the same intensity of the Gaussian noise or salt and pepper noise. The similar robustness is also shown in anti-cropping and anti-JPEG compression performance. The proposed method can be used in the pre-processing stage of the holographic watermark in information hiding application or digital storage, transform and processing of the hologram, etc.

Key words digital holography; nonuniform quantization; Fourier transform; digital compression and expansion

1 引言

数字全息变换指借助全息思想从一幅数字图像文件出发,通过数字手段获取全息变换结果,并对变换结果进行量化及编码处理,从而得到记录有原始图像信息的另一幅数字图像^[1]。通过逆变换方法,还可以从变换结果图像中恢复出原始图像信息。与未经变换的原始图像相比,经过全息变换后的数字全息图既具有数字图像的基本特性,可以很方便地运用数字手段进行各种图像处理操作,同时该全息图又具有光学全息图的一般特征,信息冗余量大,从任意的全息图碎片都可完整再现原始图像信息,具有很强的抗剪切能力,并且对一般的图像攻击如压缩、缩放、噪声等均具有一定的稳健性。近年来运用数字全息变换的思想进行信息隐藏的研究成为信息安全领域研究的一个热点问题,数字水印技术中在原始水印信号预处理阶段应用数字全息变换的方法可以带来更高的安全性和更好的稳健性^[2]。但为了得到数字形式的图像文件,一般需要对全息

收稿日期: 2010-06-05; **收到修改稿日期:** 2010-07-10

基金项目: 福建省教育厅 B 类(JB07051, JB09064)资助课题。

作者简介: 陈家祯(1971—),女,硕士,副教授,主要从事信息处理及 EDA 方面的研究。E-mail: jiazhen_chen@fjnu.edu.cn

变换的结果数据进行量化编码处理,而量化过程所带来的量化误差在一定程度上影响了全息图逆变换后的再现像质量^[3]。目前一般因后续光学处理的需要,侧重于对全息变换结果应用均匀量化编码方法。在均匀量化方案中,量化间隔是固定的,量化噪声功率取决于量化间隔,因此对小信号所引入的量化噪声大。而对于数字全息变换结果信号,大部分信号的取值集中在小信号范围,因此采用均匀量化编码,必然造成信号量噪比低,影响了再现像质量。在数字水印技术等应用中数字全息图将主要应用于后续的数字处理,因此可以采用更灵活的编码方式。本文针对均匀量化存在的问题,提出一种对全息变换结果数据进行非均匀量化编码处理的方案,与采用均匀量化编码方案生成的数字全息灰度图相比较,可以做到在相同编码位数情况下具有更低的量化噪声功率及更好的再现像恢复效果,并且在抗各种常见攻击方面采用非均匀量化方案生成的数字全息图像除具有与采用均匀量化方案生成的数字全息图像相类似的特性外,在抗噪声方面表现出更强的稳健性,可作为对原始信息进行预处理的一种新方案来使用。

2 数字全息原理

数字全息建立在计算全息^[4,5]理论上,利用全息编码技术实现原始信息的编码处理,不同的编码方法对应产生不同类型的计算全息图。傅里叶变换全息图记录物光波傅里叶变换谱的振幅和相位信息,具有抗剪切能力强、便于数字实现等优点,在信息隐藏领域中常作为水印信号来使用。

设物光波表达式为

$$o(x, y) = |o(x, y)| \exp[j\varphi(x, y)], \quad (1)$$

在数字全息水印应用中 $|o(x, y)|$ 可以对应一幅数字图像信号, $\varphi(x, y)$ 为服从高斯分布的随机相位,加入随机相位的目的是平滑傅里叶变换谱以提高再现像质量。其傅里叶变换为

$$O(\zeta, \eta) = \iint o(x, y) \exp[-2\pi j(\zeta x + \eta y)] dx dy, \quad (2)$$

为避免对傅里叶变换谱的复振幅进行编码,加入参考光使相位信息隐含在经编码后的非负函数中,参考光 $R(\zeta, \eta)$ 定义为

$$R(\zeta, \eta) = R_0 \exp[2\pi j(a\zeta + b\eta)], \quad (3)$$

则物波和参考光相干涉后的光场分布为

$$H(\zeta, \eta) = |O(\zeta, \eta) + R(\zeta, \eta)|^2 = |O(\zeta, \eta)|^2 + |R(\zeta, \eta)|^2 + O^*(\zeta, \eta)R(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta)R^*(\zeta, \eta), \quad (4)$$

式中第一项和第二项对应傅里叶变换全息图的晕轮光和中心亮点,将影响物波再现质量,当作为数字全息水印信号使用时,可以将其去除,即

$$H_1(\zeta, \eta) = O^*(\zeta, \eta)R(\zeta, \eta) + O(\zeta, \eta)R^*(\zeta, \eta). \quad (5)$$

(5)式即为数字全息水印信号的表达式,记录了原始物波傅里叶变换谱的幅度和相位信息。为了得到 256 色灰度图形式的数字全息图像文件,需要对(5)式进行量化及编码处理,量化后的信号可表示为

$$H'_1(\zeta, \eta) = H_1(\zeta, \eta) + n_1(\zeta, \eta). \quad (6)$$

假设 $n_1(\zeta, \eta)$ 服从均匀分布,其概率密度函数为

$$f_{n_1}(x) = \begin{cases} \frac{1}{H_{1\max} - H_{1\min}} & H_{1\min} \leq x \leq H_{1\max} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

3 数字全息水印信号的不同量化编码方案

3.1 均匀量化编码方案

设(5)式中频谱最大值为 $H_{1\max}$, 最小值为 $H_{1\min}$, 采用均匀量化,则每个量化区间的量化间隔是相同的。取量化级数为 m , 则量化间隔 $\Delta = (H_{1\max} - H_{1\min})/m$, 设相邻量化级之间的一个抽样值指定给靠近它的一级数值,即量化值为 $\text{Round}[(H_1 - H_{1\min})/\Delta]$, 其中 Round 表示舍入并取整运算。当量化级数取 256 时,即可得到一幅灰度范围位于 0~255 的数字全息图像。

设原始图像为 64×64 点二值图像,图 1 是采用均匀量化方式得到的 64×64 点 256 色数字全息灰度图

及其再现结果,在输出平面上可同时观察到原始像及共轭像。

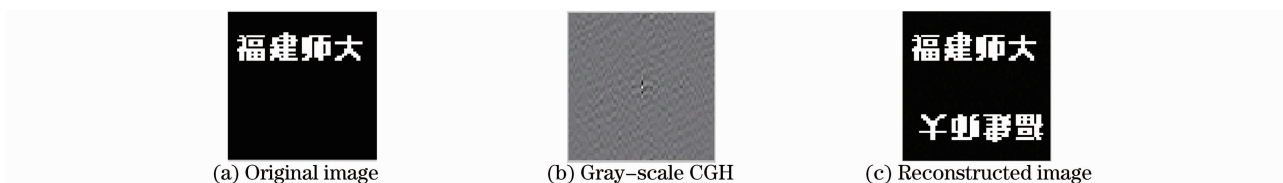


图 1 均匀量化数字全息模拟

Fig. 1 Digital holography simulation of uniform quantization

3.2 非均匀量化编码方案

均匀量化的量化误差在 $[0, \Delta/2]$ 之间变化,只有在信号均匀分布的情况下,均匀量化才是最佳量化。而数字全息信号一般情况下不满足该条件,并且大部分信号取值集中在小信号范围内,为了能够提高小信号的信噪比,对信号进行压扩处理后再进行均匀量化编码。理论上可证明,当压扩特性曲线为对数特性时,可以做到不同的量化区间具有恒定的量噪比。为便于数字实现非均匀量化编码,方案借鉴通信系统中语音信号编码处理思想^[6],首先采用数字压扩技术先对全息图中的小信号进行扩张而对大信号进行压缩处理后再进行均匀量化编码。具体方案如下:

用 8 位二进制编码表示非均匀量化编码结果,分别用 $B_7 B_6 \dots B_0$ 表示。以正极性为例说明编码过程。

- 1) 最高位为极性码,若 H_1 为正,则 B_7 为 1, 否则 B_7 为 0。
- 2) 将区间 $(0, H_{1\max})$ 按范围 1/2 递减的规律不均匀分成 8 段, 各段用三位二进制自然码表示。
- 3) 在 8 个不均匀分段的区间中进行 16 级均匀量化, 段内编码用四位二进制自然码表示。
- 4) 根据信号的幅值判断所在的段落及段内号。
- 5) 将 8 位编码结果转换为 0~255 灰度值数据, 即可得到非均匀量化编码结果的数字全息图。

译码是一个与编码方案相反的过程。

- 1) 先对最高位 B_7 进行判断, 若 B_7 为 1, 则取值为正, 否则为负。
- 2) 由 $B_6 \sim B_4$ 判断段落号。
- 3) 由 $B_3 \sim B_0$ 判断段内号。
- 4) 根据 8 位译码结果及全息图制作参数恢复原始图像。

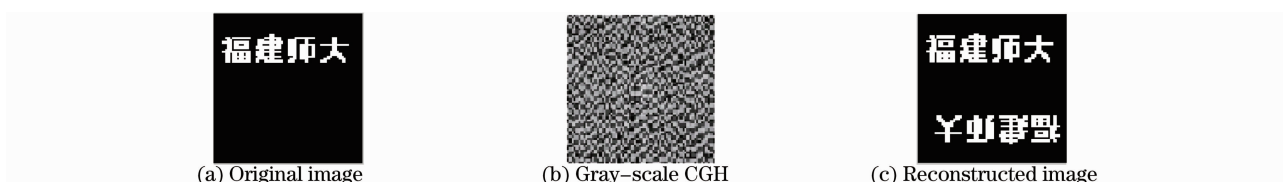


图 2 非均匀量化方案数字全息模拟

Fig. 2 Digital holography simulation of nonuniform quantization

图 2 为采用非均匀量化方案所得到的数字全息图及其再现结果。由图 2 可以看出从非均匀量化数字全息图也能很好再现原始图像,为了对不同量化方案下的数字再现像质量进行比较,引入能量归一化均方误差 (NMSE), NMSE 可用于表示降质图像与原图像之间相应像素幅值误差的统计关系,均方误差越小,从统计意义上降质图像与原图像的差异越小,图像逼真度越高^[7]。其定义为

$$\Delta_{\text{NMSE}} = \frac{\sum_j \sum_k [f(j, k) - \tilde{f}(j, k)]^2}{\sum_j \sum_k [f(j, k)]^2}, \quad (8)$$

这里用 $f(j, k)$ 表示从未经量化的全息图数据中复原的数字再现像, $\tilde{f}(j, k)$ 表示从量化后的 256 色数字全息灰度图中复原的数字再现像,可计算得均匀量化与非均匀量化方案下的能量归一化均方误差 Δ_{NMSE} 分别为 0.0035 和 0.00074,说明从非均匀量化数字全息图可以复原出相对更高质量的数字再现像。

3.3 两种不同量化方案下信号量噪比分析

对于均匀量化噪声,根据统计分析可以证明^[8],量化噪声的功率为: $\sigma^2 = \Delta^2/12$, Δ 为量化间隔。与均匀

量化方案相比,非均匀量化方案中各个段落的量噪比是不同的,表1以正极性为例显示了两种不同量化方案下的量化噪声情况。

表1 不同量化方案下量化噪声功率比较

Table 1 Quantization noise power comparison between two different quantization schemes

Paragraph number	Amplitude range	Nonuniform quantization noise power	Uniform quantization noise power	Quantization noise ratio /dB
1	$(0, \frac{1}{128} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{2048} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	24
2	$(\frac{1}{128} H_{1\max}, \frac{1}{64} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{2048} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	24
3	$(\frac{1}{64} H_{1\max}, \frac{1}{32} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{1024} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	18
4	$(\frac{1}{32} H_{1\max}, \frac{1}{16} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{512} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	12
5	$(\frac{1}{16} H_{1\max}, \frac{1}{8} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{256} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	6
6	$(\frac{1}{8} H_{1\max}, \frac{1}{4} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	0
7	$(\frac{1}{4} H_{1\max}, \frac{1}{2} H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{64} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	-6
8	$(\frac{1}{2} H_{1\max}, H_{1\max})$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{32} H_{1\max})^2$	$\frac{1}{12} (\frac{1}{128} H_{1\max})^2$	-12

从表1中可以看出第1~5段,信号量噪比得到不同程度的改善,特别是对于小信号,量噪比改善更加明显,第6段信号量噪比与均匀量化相同,对于第7和第8段,信号量噪比不但没有改善,反有了一定程度的下降。但对一般数字全息变换结果信号,小信号占绝大多数,因此采用非均匀量化方案,可以从总体上改善全息信号的量噪比。

4 非均匀量化数字全息图在信息隐藏方面的应用

数字水印技术中水印算法的稳健性一方面依赖于嵌入与提取算法的设计,另一方面也往往与水印信号的自身特性有关。数字全息水印信号因具有全息图的特征,比一般水印信号具有更强的抗剪切性,并且对JPEG压缩、高斯噪声、椒盐噪声等同样具有一定的稳健性。文献[2]提出一种以数字全息和离散余弦变换为基础的数字水印技术,算法具有良好的抗JPEG压缩和抗剪切性。而将非均匀量化数字全息图作为水印信号嵌入到载体图像中,则相比于文献[2]中的基于均匀量化的数字全息水印算法,除具备类似的良好抗剪切及抗JPEG压缩特性外,在抗噪声方面表现出更好的稳健性。

4.1 叠加高斯噪声后的数字再现效果

设水印载体图像为 256×256 点256色灰度图像,如图3(a)所示,图3(b)为 64×64 点二值水印信号,图3(c),(d)为采用两种不同编码方法生成的数字全息水印信号。

采用文献[2]中的算法,通过修改载体图像离散余弦变换的中频系数嵌入水印信号,分别在载体图像中嵌入两种不同类型的数字全息水印信号,并叠加不同强度的高斯噪声,得到图4测试结果。从图4和图5可以看出在受到相同强度高斯噪声干扰时,从嵌有非均匀量化数字全息水印信号的载体图像中可以恢复出相对更清晰的数字再现像。

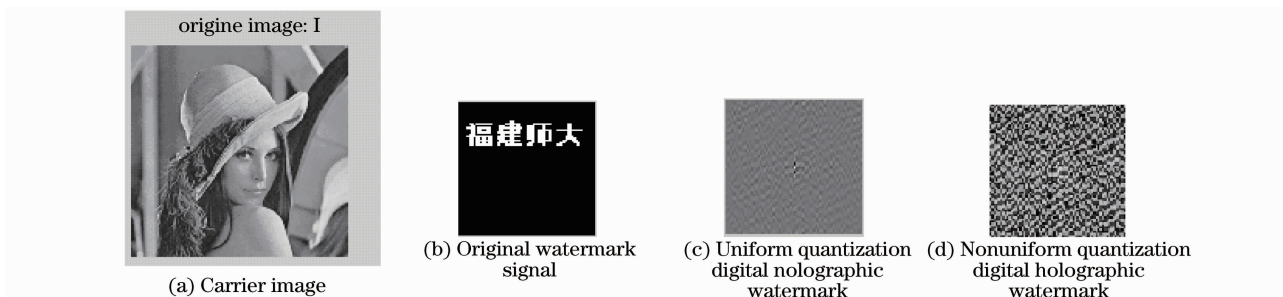


图 3 数字全息水印算法模拟

Fig. 3 Simulation for digital holographic watermark algorithm

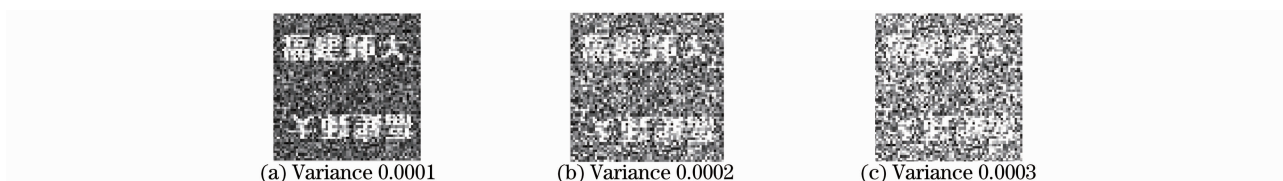


图 4 在嵌有均匀量化数字全息水印的载体图像中叠加不同强度高斯噪声后的数字再现像

Fig. 4 Digital reconstruction images with different Gaussian noise intensities for carrier image embedded with uniform quantization digital holography

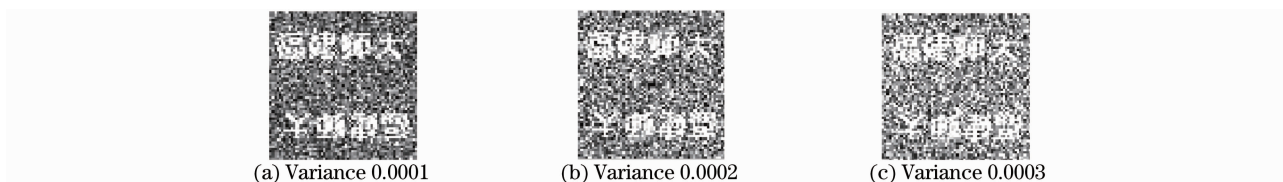


图 5 在嵌有非均匀量化数字全息水印的载体图像中叠加不同强度高斯噪声后的数字再现像

Fig. 5 Digital reconstruction images with different Gaussian noise intensities for carrier image embedded with nonuniform quantization digital holography

4.2 叠加椒盐噪声后的数字再现效果

向嵌有不同类型数字全息水印信号的载体图像中叠加强度分别为 0.0001, 0.0003, 0.0005, 0.001 的椒盐噪声后的数字再现像如图 6 和图 7 所示。从全息图数字再现像的清晰度可以看出采用非均匀量化数字全息水印具有更强的抗椒盐噪声能力。

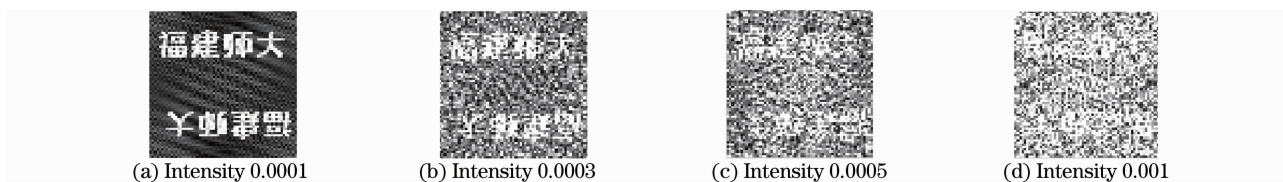


图 6 嵌有均匀量化数字全息水印信号的载体图像中不同叠加强度椒盐噪声后的数字再现像

Fig. 6 Digital reconstruction images with different salt and pepper noise intensities for carrier image embedded with uniform quantization digital holography

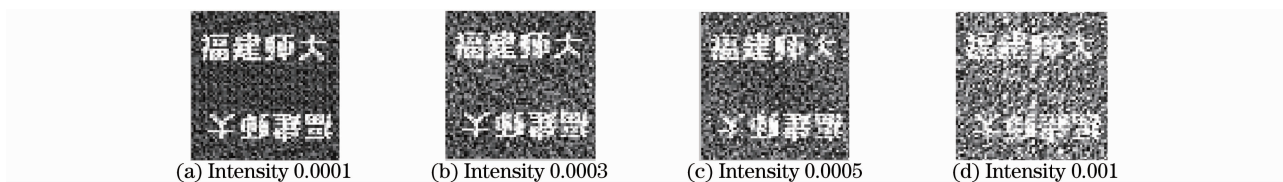


图 7 嵌有非均匀量化数字全息水印信号载体图像中叠加不同强度椒盐噪声后的数字再现像

Fig. 7 Digital reconstruction images with different salt and pepper noise intensities for carrier image embedded with nonuniform quantization digital holography

4.3 抗剪切性能

傅里叶变换数字全息图的最大优势是具有良好的抗剪切特性,在信息隐藏领域该特性常作为水印信号的重要特性之一被使用^[9,10],而采用非均匀量化方案生成的数字全息图也保持良好的抗剪切性。在实际应用中,为了减少全息变换结果数据之间的相关性,以进一步提高抗剪切性能,可对数字全息图作置乱处理。图8是对嵌有经Arnold置乱后的非均匀量化数字全息水印的载体图像作剪切后的数字再现像,图中百分比表示剪切后的剩余图像与原图像的大小比值。从图中可以看出,非均匀量化数字全息水印仍保持与均匀量化数字全息水印相类似的良好抗剪切性能,并且在水印载体图像遭受大面积裁剪情况下置乱处理对再现像清晰度有明显的改善作用。

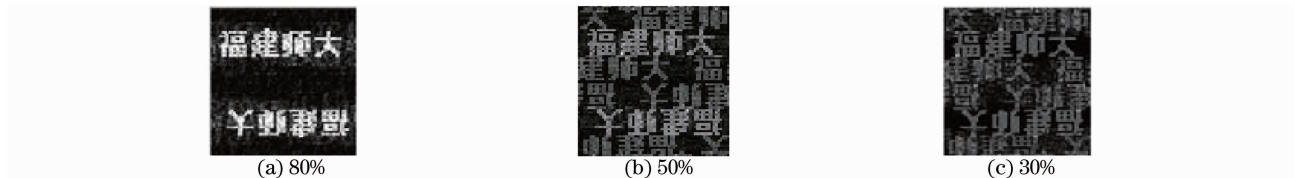


图8 对嵌入置乱后数字全息水印的载体图像作不同程度剪切后的数字再现像

Fig. 8 Reconstructed images after different croppings for carrier image embedded with scrambling digital holographic watermark

4.4 JPEG压缩后的数字再现效果

对嵌有非均匀量化数字全息水印的载体图像进行JPEG压缩,得到图9所示数字再现像。从再现像可以看出,采用非均匀量化数字全息算法同样具有一定的抗JPEG压缩能力。

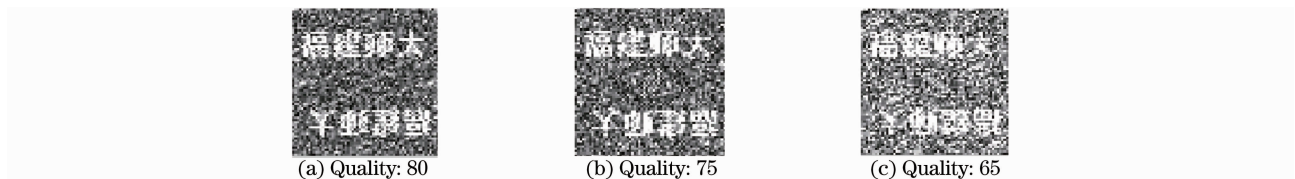


图9 不同JPEG质量压缩因子下数字全息水印的再现像

Fig. 9 Reconstructed images with different JPEG compression quality

5 结 论

通过对非均匀量化数字全息图量化噪声功率分析及抗各种常见攻击的仿真实验结果表明,所提出的数字全息图非均匀量化编码方案具有相对较低的量化噪声功率,当作为数字水印信号使用时,除保持均匀量化数字全息图的抗剪切性、抗JPEG压缩等特性外,在抗高斯噪声、椒盐噪声方面表现出更好的稳健性。所提出的方法及所生成的全息图的特性可应用于信息隐藏或数字水印技术中的全息水印图像预处理及全息图的数字化存储、转换等图像处理中。

参 考 文 献

- 1 Luo Jiangtao, Zeng Qingji, Guo Hong *et al.*. Holographic transformation of computer images using computer generated holography[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **11**(13): 1171~1173
 雒江涛, 曾庆济, 郭洪等. 利用计算机全息实现数字图像的全息变换[J]. *光电子·激光*, 2002, **11**(13): 1171~1173
- 2 Yu Chiliang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
 尉迟亮, 顾济华, 刘薇等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 355~361
- 3 O. Erman Okman, Gozde Bozdagi Akar. Quantization index modulation-based image watermarking using digital holography [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(1): 243~252
- 4 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer-generated Hologram[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. 69~79
 虞祖良, 金国藩. 计算机全息图[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984. 69~79
- 5 Yu Meiwen. Optical Holography and its Applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 297~301

- 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 297~301
- 6 Fan Changxin, Cao Lina. Communication Principles[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2007. 265~281
樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 265~281
- 7 Peng Xiang, Wei Hengzheng, Zhang Peng. Introduction to Optical Information Security[M]. Beijing: Science Press, 2008. 118~127
彭翔, 位恒政, 张鹏. 光学信息安全导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 118~127
- 8 Shen Zhenyuan, Nie Zhiquan, Zhao Xuehe. Communication System Principle[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. 280~294
沈振元, 聂志泉, 赵雪荷. 通信系统原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. 280~294
- 9 Takai N., Mifune Y.. Digital watermarking by a holographic technique[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 10 Shaohua Tao, Xiacong Yuan. Practical implementation of the phase-quantization technique in an iterative Fourier-transform algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(10): 2089~2092