

利用附加密钥旋转在光学联合相关结构中 实现多二值图像加密

秦 怡 吕晓东 巩 琼 蒋华龙

(南阳师范学院物理与电子工程学院, 河南 南阳 473061)

摘要 在一种改进的光学联合变换相关加密系统中,将附加密钥改为圆形并提出了基于附加密钥旋转复用而实现多幅二值图像加密的方法。加密时,对于不同的待加密的图像,将附加密钥旋转至不同的角度,生成相应的联合功率谱。将这些得到的联合功率谱进行叠加,得到的复合联合功率谱即为最终的密文。解密时,将附加密钥旋转至加密时所处于的对应角度,对复合联合功率谱进行解密,即得到相应的解密结果。理论分析和计算机模拟结果表明,解密结果对附加密钥的旋转角度非常敏感,因而该旋转角度可作为一个有效的参数来实现多图像加密。同时,也分析了加密图像的数量对于解密结果的影响。

关键词 信息处理;图像加密;光学联合相关变换;密钥旋转复用;多图像加密;二值图像

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0307002

Additional Key Rotation Multiplexing Encryption Using Joint Transform Correlator Architecture

Qin Yi Lü Xiaodong Gong Qiong Jiang Hualong

(College of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University,
Nanyang, Henan 473061, China)

Abstract A key rotation multiplexing method to the modified joint transform correlator arrangement is introduced. For encryption, the rounding key with a certain rotation angle is assigned to each image to be encrypted to generate a corresponding joint power spectrum. Then the final encryption result, namely multiplexed joint power spectrum, will be obtained by summing the above mentioned joint power spectrum. The decryption of the multiplexed joint power spectrum with the correct rotation angle of the additional key will show the corresponding primary images. Theoretical analysis and computer simulations reveal that rotation angle of the additional key is a valid parameter to perform image multiplexing encoding with the modified joint transform correlator architecture. Also, computer simulations to investigate how the number of encrypted images affects the decryption quality are performed.

Key words signal processing; image encryption; joint transform correlator; key rotation multiplexing; multiple images encryption; binary image

OCIS codes 070.4560; 070.1170; 090.2880

1 引 言

由于光学信息处理技术能够并行地处理二维图像信息,因而其在信息安全领域内得到了广泛的应用^[1~9]。其中最为典型的例子是双随机相位编码系统(DRPE)。该系统可将一幅图像加密为平稳白噪声,对于暴力攻击具有极强的稳健性,所以人们对该

系统以及由其衍生的各种系统进行了较为深入的研究^[10~12]。但是该系统也存在一些固有的缺点,例如,它在结构上基于 4f 图像处理系统,两个随机相位板必须在空间位置上精确对准;此外,双随机相位加密系统的加密结果为复数,记录及传输过程都非常不便。相比之下,Nomura 等^[13]于 2000 年提出了

收稿日期: 2012-10-15; **收到修改稿日期**: 2012-11-22

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目(112102210386)和南阳师范学院高层次人才启动资金(nytc2006k100)资助课题。

作者简介: 秦 怡(1981—),男,硕士,讲师,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: 641858757@qq.com

一种基于光学联合变换相关结构(JTC)的光学加密系统。由于明文和密钥共享一个输入平面,因而JTC加密系统的结构更为紧凑。同时,其加密密文与解密结果均可以使用电荷耦合器件(CCD)等强度传感器件直接记录,因而受到了广泛的重视。但是,JTC也逐渐暴露出一些严重的安全性问题^[14~16]。为了提高安全性能,Rueda等^[17]又提出了一种改进的JTC光学加密系统(MJTC)。

近年来,在关注光学加密系统性能的同时,人们也提出了不少方法来提高加密的效率,先后提出了一些多图像加密和隐藏技术^[18~25]。例如,Liu等^[18,19]提出了利用迭代的分数傅里叶变换实现双图像加密方法及分数傅里叶变换域的三图像加密方法,He等^[22]在相移数字全息系统中利用随机相位匹配实现了多图像隐藏,Situ等^[23,24]利用波长复用技术,分别在菲涅耳域双随机相位编码系统以及光学联合相关变换结构中实现了多图像加密。本文在Rueda等^[17]所提出的MJTC系统中,提出采用附加密钥旋转技术来实现多幅图像加密及解密。与文献^[25]中描述的类似,本文所设计的附加密钥不再是矩形,而是圆形,这样可以在旋转的过程中保持密钥信息不丢失。进行多图像加密时,将附加密钥旋转

至不同的角度,在加密系统中将每幅待加密图像都加密成一个相应的密文,然后将这些密文进行叠加来得到最终的加密结果。解密时,在解密系统中将附加密钥旋转至不同的角度即可从密文中提取出相应的原始图像。

2 改进的光学JTC加密系统

2.1 光学JTC加密系统的原理

为了便于说明,对光学JTC加密系统的原理进行分析。图1(a)、(b)分别给出了使用JTC进行图像加密和解密的过程。方便起见,采用一维的数学描述来进行讨论,分析加密过程。在输入平面上,待加密图像 $g(x)$ (字符“A”)和相位掩模 $a(x)$ 重叠后置于输入面上 $x=a$ 处,另一掩模 $h(x)$ 则置于输入面上 $x=b$ 处。而整个输入平面又位于透镜L的前焦面上,透镜的焦距为 f 。其中 $h(x)$ 是一个与 $a(x)$ 统计独立的复数值密钥,为一个纯随机相位板 $H(\nu)$ 的逆傅里叶变换,这里 ν 表示空间频率。需要说明的是,纯随机相位板 $H(\nu)$ 并没有在系统中真正使用,而是作为一个概念出现。

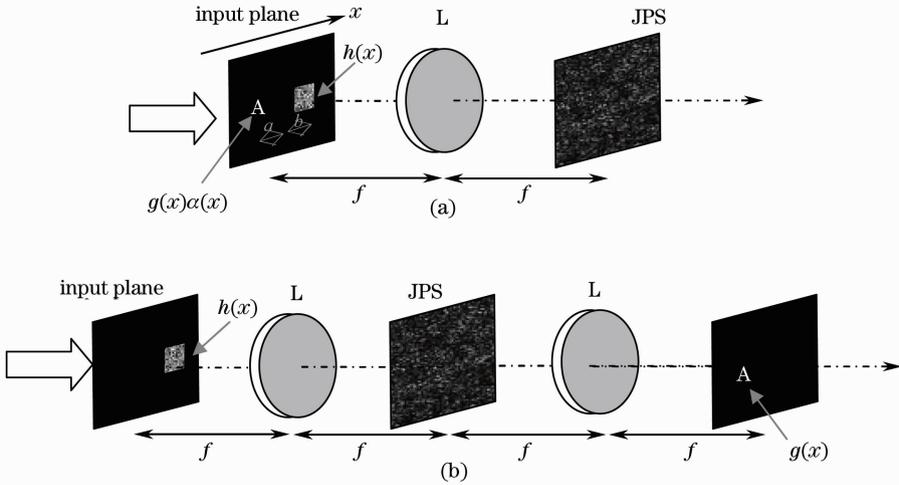


图1 基于JTC的图像加密系统。(a)加密系统;(b)解密系统

Fig.1 Optical encryption using a JTC architecture. (a) Encryption system; (b) decryption system

使用单色平面波照射输入面,在透镜L的后焦面上得到输入函数的联合功率谱(JPS):

$$F_{\text{JPS}}(\nu) = |\mathcal{F}[g(x-a)\alpha(x-a) + h(x-b)]|^2 = |G(\nu) \otimes A(\nu)|^2 + 1 +$$

$$[G(\nu) \otimes A(\nu)]^* H(\nu) \exp[-j2\pi(b-a)\nu] + [G(\nu) \otimes A(\nu)] H(\nu)^* \exp[-j2\pi(a-b)\nu], \quad (1)$$

式中 $\mathcal{F}[\]$ 为取傅里叶变换, \otimes 和上标 $*$ 分别为卷积和取共轭运算, $G(\nu), A(\nu)$ 分别为 $g(x), a(x)$ 的傅里叶变换。由于 $H(\nu)$ 是纯相位函数,因而有 $|H(\nu)|^2 = 1$ 。 $F_{\text{JPS}}(\nu)$ 为密文。如果试图对 $F_{\text{JPS}}(\nu)$ 作逆傅里叶变换而窃取原始图像,则得到

$$F_{\text{JPS}}(x) = [g(x)\alpha(x)] \cdot [g(x)\alpha(x)] + \delta(x) + h(x) \cdot [g(x)\alpha(x)] \otimes \delta(x-b+a) + [g(x)\alpha(x)] \cdot h(x) \otimes \delta(x-a+b), \quad (2)$$

式中 \cdot 为相关运算， $\delta(x)$ 为狄拉克函数。(2)式中的第一项为 $g(x)\alpha(x)$ 的自相关函数，是位于坐标 $x=0$ 处的噪声图样，若不知 $\alpha(x)$ 则无法由该项恢复出 $g(x)$ 。第三项和第四项表示 $g(x)\alpha(x)$ 与 $h(x)$ 的互相关函数，由于随机相位 $\alpha(x)$ 的存在，也是噪声图像，在不知 $\alpha(x)$ 与 $h(x)$ 的情况下同样无法恢复出

$$m(x) = h(x) \otimes [g(x)\alpha(x)] \cdot [g(x)\alpha(x)] \otimes \delta(x-b) + h(x) \otimes \delta(x-b) + h(x) \otimes h(x)[g(x)\alpha(x)] \otimes \delta(x-2b+a) + g(x)\alpha(x) \otimes \delta(x-a), \quad (3)$$

(3)式中的第四项给出了原始图像的解密结果，其位于 $x=a$ 处。该项为原始图像 $g(x)$ 与相位掩模 $\alpha(x)$ 的乘积，用 CCD 等强度探测器件记录时，可以除去相位 $\alpha(x)$ 而直接得到图像 $g(x)$ 。

2.2 改进的光学 JTC 加密系统

尽管基于 JTC 的光学加密系统有突出的优点，但是目前已经暴露出不少内在的安全性问题，例如该系统可被已知明文攻击以及选择明文攻击破

原始图像。这就是光学 JTC 加密系统的基本原理。

对加密后的图像，即 $F_{JPS}(\nu)$ ，进行解密的过程如图 1(b)所示。解密密钥 $h(x)$ 置于输入平面 $x=b$ 处，经过透镜 L 进行傅里叶变换后，与联合功率谱相乘，再次利用透镜对此乘积作傅里叶变换，得到的结果为

解^[14~16]。为了提高安全性，Rueda 等^[17]提出了 MJTC 结构，该系统的加密和解密过程如图 2 所示。入射的平面光波首先被一随机相位板，也即附加密钥(AK)所调制，经过距离为 d 的衍射之后变为振幅和相位均为白噪声的复随机波前，用该复随机波前来照射输入平面，进而再用透镜 L 作傅里叶变换得到输入平面的联合功率谱，即改进的 JPS (MJPS)。

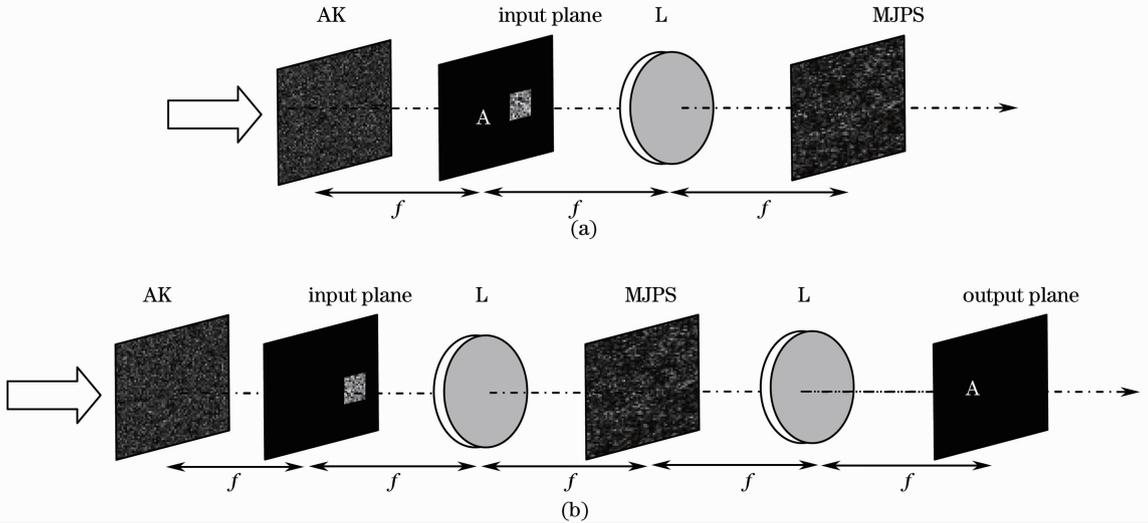


图 2 改进的光学 JTC 的图像加密系统。(a)加密系统；(b)解密系统

Fig. 2 Optical encryption using a modified JTC architecture. (a) Encryption system; (b) decryption system

由于附加密钥的引入，使得基于 JTC 的光学加密系统的密钥数量增加了 1 倍，而且引入了一个附加的参数 d ，因而系统的安全性得到了很大地提高。

在 Rueda 等^[17]提出的 MJTC 结构中，附加密钥为矩形，这不利于使用密钥旋转进行多图像加密复用，其原因在于矩形密钥在旋转过程中会造成信息的丢失。若将密钥设计成圆形，则在旋转的过程中可实现信息最大限度的保持。用于复用的圆形密钥如图 3(a)所示，其大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。在圆形区域内的相位数值均匀地分布于 $[0, 2\pi]$ 之间。在接下来的模拟中，使用 Matlab(R2011a)来模

拟整个加密和解密过程。首先测试了圆形附加密钥对图像的加密效果，加密与解密过程所用的系统分别如图 2(a)、(b)所示，其中所使用照明光波波长参数为 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ， $d=20 \text{ mm}$ ，加密与解密结果在图 3 中给出。图 3(b)为原始图像，大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ ，图 3(c)、(d)分别为加密结果和对应的解密结果。

从图 3(d)可以看出，尽管图样受噪声影响较大，但是依然可以清晰地分辨出原始的图形。对于 MJTC 系统来说，解密时只有使用正确的附加密钥才能解密出完全正确的解密结果。因为本文的目的

是为了实现密钥的旋转复用,因此研究解密结果对密钥旋转角度错误的容忍度是非常有意义的。假设加密时附加密钥的旋转角度为 0° ,模拟了解密时附

加密钥相对于原始位置分别旋转 $0.1^\circ, 0.2^\circ, 0.6^\circ, 1^\circ$ 时的解密结果,这分别在图4(a)~(d)中给出。

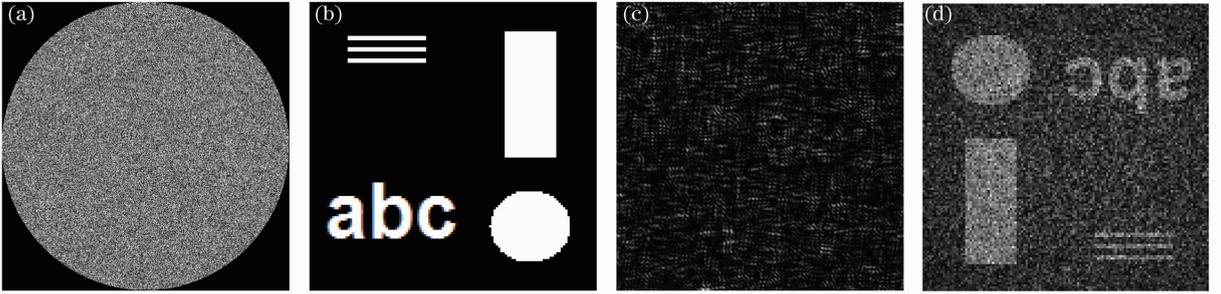


图3 使用圆形附加密钥时 MJTC 系统的加密和解密结果。(a)圆形附加密钥;(b)原始图像;(c)加密图像;(d)解密图像
Fig. 3 Encryption and decryption results with the rounding additional key. (a) Rounding additional key; (b) original image; (c) encrypted image; (d) decrypted image

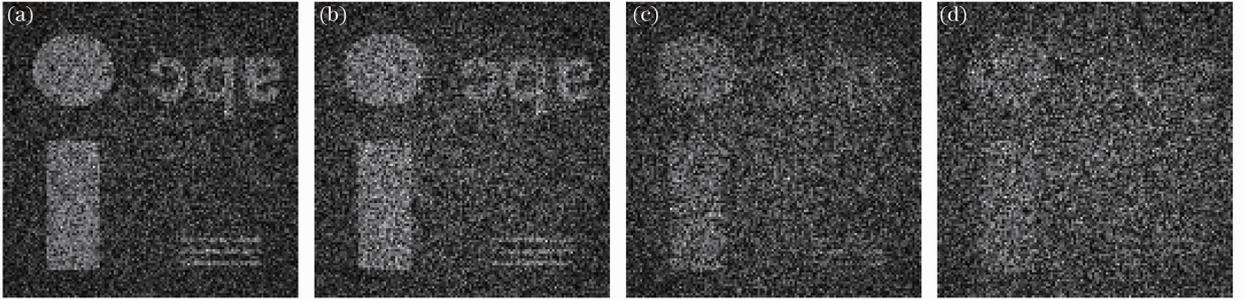


图4 解密密钥与原始密钥相差不同角度时的解密结果。(a) 0.1° ; (b) 0.2° ; (c) 0.6° ; (d) 1°

Fig. 4 Decryption results with rotation of the additional key at different angles. (a) 0.1° ; (b) 0.2° ; (c) 0.6° ; (d) 1°

可以看出,随着解密时密钥旋转角度的增大,解密结果的可辨识度迅速降低,当与正确角度之差为 1° 时,解密结果已经类似于白噪声。这说明解密结果对附加密钥的旋转是非常敏感的,附加密钥位于不正确的旋转角度(与正确的旋转角度之差大于 1°)时得到的是类似于白噪声的解密结果。因此,与先前所提及的波长、距离等复用方法类似,这种现象提供了利用附加密钥复用来实现多图像加密的可能。解密时,采用的附加密钥不同,则得到的应该是加密时与该附加密钥相关联的原始图像。这就是本文所提方法的基本原理。

3 利用密钥旋转复用在 MJTC 中实现多图像加密

在图2所示的系统中使用圆形附加密钥替代矩形附加密钥,就构成了本文所设计的密钥旋转复用加密系统。对于每一个待加密的图像,附加密钥都旋转至一个不同的角度,得到相应的加密密文。再将所有的密文叠加,从而形成最终的加密结果。为了避免混叠,根据第2.2节的结论,加密时附加密钥

不同的旋转角度之间的间隔要大于 1° 。解密时,将密钥旋转至不同的角度,对应的原始图像就会被解密出来。假设第 i 幅待加密图像为 $g_i(x), i = 1, \dots, N$,加密该幅图像时附加密钥相对于原始位置的旋转角度为 φ_i 。同时,假设加密过程所涉及的其他参数及密钥均相同。那么,第 i 幅图像的加密过程可以表示成如下形式:

$$F_{\text{MJPS}}^i = F_{\text{MJTC}}[g_i(x); \varphi_i], \quad (4)$$

式中 F_{MJTC} 是指利用图2(a)所示系统加密过程中的加密函数,联合功率谱 F_{MJPS}^i 则是对第 i 幅图像的加密结果,为一个强度图像。根据本文的加密方法的原理,最终的加密结果可表示为

$$F_{\text{MMJPS}} = \sum_{i=1}^N F_{\text{MJPS}}^i, \quad (5)$$

式中 F_{MMJPS} 被称为复合联合功率谱(MMJPS)函数。解密过程为加密过程的逆过程,若要解密第 i 幅图像,在图2(b)所示结构中使附加密钥旋转至 φ_i 角度,并且将MMJPS放至MJPS所在的平面,则在输出平面上得到解密结果即第 i 幅原始图像 $g_i(x)$ 。这表明,使用同一个密钥旋转至不同角度,即可把加密的 N 幅图像分别解密出来。与其他解密 N 幅图

像需要 N 个密钥的加密系统相比,本方法只需一个密钥,这在密钥传输与保存的过程中非常方便。此外,由于复合功率谱中包含着其他 $N-1$ 幅图像的联合功率谱,因而解密结果必然受到干扰噪声的影响。

4 计算机模拟

为了证实所提方法的有效性,在计算机上使用 Matlab (R2011a) 进行了模拟。模拟中,所取参数分别为 $d=20$ mm,照明所用光波波长 $\lambda=632.8$ nm。考虑最简单的情况,即利用附加密钥旋转复用对 3 幅图像进行加密和解密。图 5(a)~(c) 中给出了用于待加密的图像 $g_1(x)$, $g_2(x)$, $g_3(x)$, 分别为字符“南

阳”、“GOOD”以及“NYNU”,大小均为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。利用图 2(a) 所示结构对这 3 幅图像分别加密。在加密这 3 幅图像时,密钥 AK 的旋转角度分别为 $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 。得到的 3 个联合功率谱 MJPS1, MJPS2, MJPS3 分别在图 5(d)~(f) 中给出。然后将这些联合功率谱进行叠加,得到最终的加密结果,即 MMJPS, 在图 5(g) 中给出。图 5(h)~(j) 则是在附加密钥旋转角度分别为 $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 时,使用图 2(b) 所示的解密系统所得的解密结果。可以看出,虽然解密图像受到一定的噪声影响,但是原始图像的信息被正确地解密出来,这证实了本文所提方法的有效性。

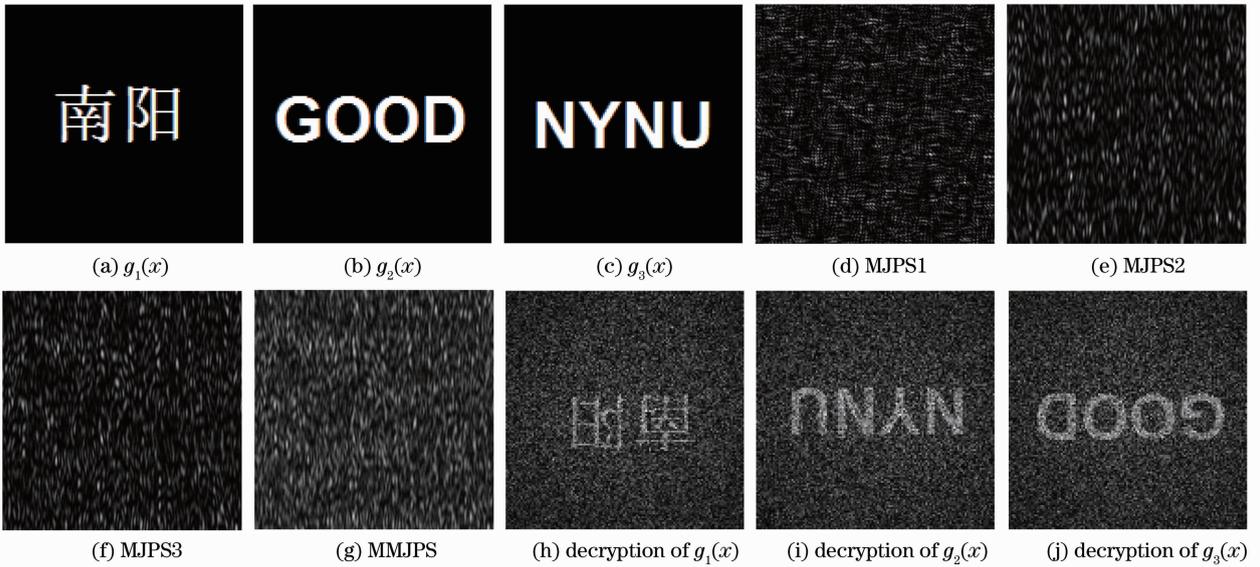


图 5 本文所提加密方法的加密和解密结果

Fig. 5 Encryption and decryption results of the proposed method

事实上,对于多图像加密系统来说,图像的重建质量与系统加密图像的数量具有密切关联,因而确定系统所能容纳的最多图像数 N_{\max} 是有意义的。当加密图像的数量小于 N_{\max} 时,附加密钥旋转至正确的角度,可以得到与这个角度相对应的、正确的解密结果。而当加密的图像大于 N_{\max} 时,即使附加密钥旋转至正确的角度,也无法得到正确的解密结果,

原因是图像之间的干扰太强,以至于恢复出来的图像淹没于噪声之中。

为了便于研究,采用相关系数 (C_c) 来描述恢复出来的图像 g_{rec} 与原始图像 g 之间的符合程度。相关系数被定义为^[26]

$$\rho = \frac{E\{[g - E(g)][|g_{\text{rec}} - E(|g_{\text{rec}}|)|]\}}{\{E\{[g - E(g)]^2\}E\{[|g_{\text{rec}}| - E(|g_{\text{rec}}|)]^2\}\}^{1/2}}, \quad (6)$$

式中 E 为求数学期望,这里省略了函数坐标。以待加密图像 $g_1(x)$ 为例,研究了系统加密图像数量 N 增加时,解密的结果以及对应的相关系数值。在对不同图像进行加密时,密钥旋转角度间隔为 2° 。模拟结果在图 6 中给出。可以看出,随着加密图像数

量的增加,相关系数随之降低,这说明图像恢复的质量随着 N 的增大而明显降低。当 $N=5$ 时,恢复出来的图像已经几乎不可辨识。经过反复的尝试,发现该系统所能同时加密的图像数量在 5 幅左右。

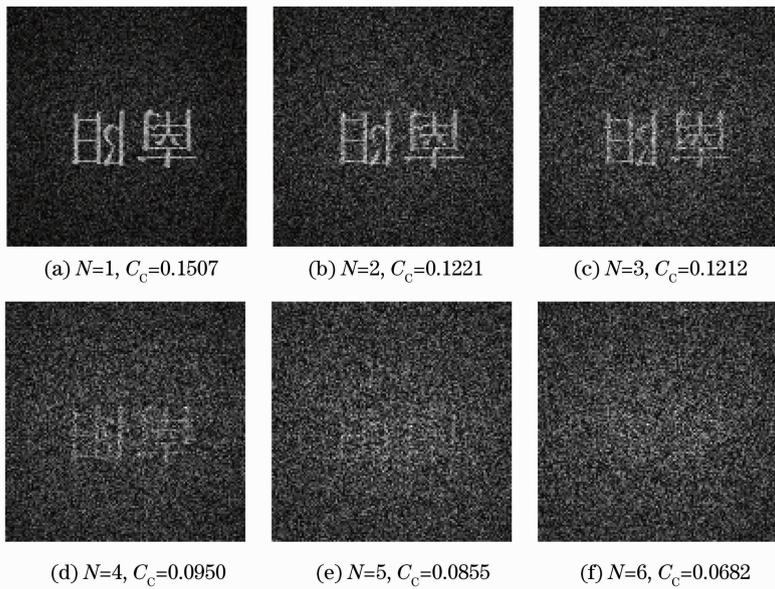


图 6 同时加密 N 幅图像时字符“南阳”的解密结果
Fig. 6 Decryption of “南阳” when N frame images encrypted in the proposal

5 结 论

在使用附加密钥的光学 JTC 加密系统中引入了附加密钥旋转复用技术,实现了多幅二值图像的加密与解密。在加密过程中,要求除了附加密钥和原始图像,加密系统的其他密钥和参数均完全相同。理论分析和计算机模拟结果表明,附加密钥的旋转角度可作为一个有效的参数来实现多图像加密。最后研究了加密图像数量对解密结果的影响,结果显示,随着加密图像数量的增加,图像的解密质量逐渐下降,利用本方法加密 5 幅左右图像时,解密后可以有效地获取原始图像。

参 考 文 献

- 1 Wan Qin, Xiang Peng. Asymmetric cryptosystem based on phase-truncated Fourier transforms [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 118~120
- 2 Xi Sixing, Sun Xin, Liu Bing *et al.*. New image encryption technology of image based on computer generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 040902
席思星, 孙欣, 刘兵等. 基于计算全息的双随机相位图像加密技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 040902
- 3 Qin Yi, Zhang Shuai, Gong Qiong *et al.*. Virtual optical image encryption based on interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1007001
秦怡, 张帅, 巩琼等. 基于干涉原理的虚拟光学加密系统[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1007001
- 4 Nanrun Zhou, Yixian Wang, Lihua Gong *et al.*. Novel single-channel color image encryption algorithm based on chaos and fractional Fourier transform [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(12): 2789~2796
- 5 Chen Daqing, Zhou Hao, Tao Zhi *et al.*. Fourier computer-generated hologram digital watermarking with nonlinear

amplitude limiting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0207002

陈大庆, 周皓, 陶智等. 非线性限幅傅里叶计算全息的数字水印方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0207002

6 Yang Xiujuan, Zhang Xiaoqiu, Yang Ming *et al.*. Properties of the fractional dual nonlinear correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0107002

杨秀娟, 张晓秋, 杨明等. 分数双重非线性相关器特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0107002

7 Xiaogang Wang, Daomu Zhao. Security enhancement of a phase-truncation based image encryption algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(36): 6645~6651

8 Yan Zhang, Bo Wang. Optical image encryption based on interference [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(21): 2443~2445

9 Yujing Han, Yunhai Zhang. Optical image encryption based on two beams' interference [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(9): 1690~1692

10 Philippe Refregier, Bahram Javidi. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 767~769

11 Bor Wang, Ching-cherng Sun, Wei-chia Su *et al.*. Shift-tolerance property of an optical double-random phase-encoding encryption system [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(26): 4788~4793

12 Peng Xiang, Tang Hongqiao, Tian Jindong. Ciphertext-only attack on double random phase encoding optical encryption system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2629~2636

彭翔, 汤红乔, 田劲东. 双随机相位编码光学加密系统的唯密文攻击[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2629~2636

13 Takanori Nomura, Bahram Javidi. Optical encryption using a joint transform correlator architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(8): 2031~2035

14 Wan Qin, Xiang Peng, Xiangfeng Meng. Cryptanalysis of optical encryption schemes based on joint transform correlator architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(2): 028201

15 John Fredy Barrera, Carlos Vargas, Myrian Tebaldi *et al.*. Chosen-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(20): 3917~3921

16 John Fredy Barrera, Carlos Vargas, Myrian Tebaldi *et al.*

- Known-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3553~3555
- 17 E. Rueda, M. Tebaldi, R. Torroba *et al.*. Three-dimensional key in a modified joint transform correlator encryption scheme [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4321~4326
- 18 Zhengjun Liu, Shutian Liu. Double image encryption based on iterative fractional Fourier transform [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**(2): 324~329
- 19 Zhengjun Liu, Jingmin Dai, Xiaogang Sun *et al.*. Triple image encryption scheme in fractional Fourier transform domains [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(4): 518~522
- 20 Zhengjun Liu, Qing Guo, Lie Xu *et al.*. Double image encryption by using iterative random binary encoding in gyrator domains [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 12033~12043
- 21 Xiaogang Wang, Daomu Zhao. Multiple-image encryption based on nonlinear amplitude-truncation and phase-truncation in Fourier domain [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(1): 148~152
- 22 M. Z. He, L. Z. Cai, Q. Liu *et al.*. Multiple image encryption and watermarking by random phase matching [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**(1-3): 29~37
- 23 Guohai Situ, Jingjuan Zhang. Multiple-image encryption by wavelength multiplexing [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1306~1308
- 24 Dafne Amaya, Myrian Tebaldi, Roberto Torroba *et al.*. Wavelength multiplexing encryption using joint transform correlator architecture [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(11): 2099~2104
- 25 Xiaoyong Liang, Xianyu Su, Sikun Li *et al.*. Key rotation multiplexing for multiple-image optical encryption in the Fresnel domain [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(4): 889~894
- 26 Chunhui Niu, Xiaoling Wang, Xianhui Mao. Multiple-image hiding based on interference principle [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 2012, **43**(6-10): 91~99

栏目编辑：何卓铭