

联合变换相关器光学多图像并行加密系统 稳健性分析与优化

刘 杰^{1,2}, 白廷柱¹, 沈学举², 窦帅风², 林 超³, 陈 琪²

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

²军械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

³海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001

摘要 光学加密系统的稳健性直接决定其密文在存储和传输过程中的抗干扰能力, 并且通常从密文抗裁剪和抗噪声干扰两方面来衡量。针对联合变换相关器光学并行加密系统的多图并行加密和任意图像再现的功能特点, 仿真并分析其稳健性。结果表明, 当密文面积受到 50% 裁剪时, 各通道图像解密效果明显降低, 部分解密图像与原始图像的相关系数(CC)低至 0.2 左右。分析其原因并对联合功率谱分布进行优化。仿真结果表明, 加密系统不仅稳健性得到显著提升(当密文面积受到 60% 裁剪时, 各通道 CC 值均大于 0.49), 且能保持优化前加密系统在抗噪声干扰方面的优势。最后, 搭建光学实验系统, 验证了该加密系统稳健性提升方法的有效性。

关键词 图像处理; 光学加密; 稳健性; 联合功率谱优化; 多图像; 联合变换相关器

中图分类号 O438.1; TN911.74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1210001

Robustness Analysis and Optimization of Parallel Encryption System for Multi-Channel Images in an Optical Joint Transform Correlator Architecture

Liu Jie^{1,2}, Bai Tingzhu¹, Shen Xueju², Dou Shuaifeng², Lin Chao³, Chen Qi²

¹Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Department of Opto-Electronics Engineering, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

³Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract The robustness of an optical encryption system directly determines the anti-jamming capability of the ciphertext in the process of storage and transmission, and is always evaluated in the form of the ability against noise and occlusion attacks. The parallel encryption system for multi-channel images based on a joint transform correlator can encrypt the multi-channel images simultaneously into a single ciphertext, and also recover the arbitrary original images with corresponding keys. The robustness of this system is simulated and analyzed. The results show that the decryption effect of each channel is reduced obviously when the ciphertext area is cut by 50%. The correlation coefficient (CC) values between some original and decryption images get the level of about 0.2. The reason is analyzed and the arrangement of the joint power spectrum is optimized. The simulation results show that not only the robustness of the encryption system is significantly improved, especially when the ciphertext area is cut by

收稿日期: 2017-06-29; **收到修改稿日期:** 2017-07-24

基金项目: 河北省自然科学基金(F2016506014)

作者简介: 刘 杰(1983—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事光信息处理以及红外技术方面的研究。

E-mail: yclj07@163.com

导师简介: 白廷柱(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电成像技术和红外仿真等方面的研究。

E-mail: tzhubai@bit.edu.cn(通信联系人)

60%, the CC values of all channels are greater than 0.49, but also the advantage on resisting noise attacks can be maintained. Finally, an optical experiment system is built to verify the effectiveness of the proposed method for improving the robustness of the encryption system.

Key words image processing; optical encryption; robustness; joint power spectrum optimization; multi-channel images; joint transform correlator

OCIS codes 100.4998; 060.4785; 070.4550

1 引 言

自 Refregier 等^[1]提出双随机相位编码光学图像加密方法以来,许多新的加密方法和改进方法相继被提出,例如基于菲涅耳变换的双随机相位编码方法^[2]、基于相移数字全息的双随机相位编码方法^[3-4]、基于压缩感知的光学加密方法^[5-6]、量子图像加密^[7-8]、基于联合变换相关器(JTC)的光学加密方法等。其中,基于 JTC 的光学加密方法由于其加密系统结构简单、不需要制作复共扼密钥、密钥模板不需要精确对准、加密图像即联合功率谱(JPS)便于记录和传输等,已成为一种具有实用性的光学加密方法。

光学多图像加密具有高存储效率的特点,在提高信息传输效率和多用户认证等方面具有重要应用前景。因此,一些新的多图像加密方法不断被提出,主要利用波长复用^[10-13]、相位模板旋转复用^[14-15]、偏振复用^[16]、多孔径复用^[17]、离散余弦和非线性分数梅林变换^[18]等进行多图像加密。为简化加密系统结构、减少复用过程中元器件的机械运动,前期设计了一种 JTC 光学多图像并行加密系统^[19],利用相位调制技术单步完成了多图像并行加密,并在解密阶段借助不同密钥组合实现了任意加密图像的再现。

光学加密系统的稳健性分析是评估该系统抗干扰能力的重要环节^[20-21]。为全面评估 JTC 光学多图像并行加密系统的抗干扰性能,本文从系统加、解密原理出发,仿真并分析其密文抗裁剪和抗噪声干扰两方面的性能,查找出影响系统稳健性的关键因素,并开展 JPS 分布优化设计。最后通过仿真实验和光学实验证明优化后系统稳健性提升方法的有效性。

2 JTC 光学多图像并行加密系统

JTC 光学多图像并行加密原理如图 1(a)所示。将输入相位模板叠加在待加密图像上,置于输入面物窗口;将作为密钥的相位模板置于输入面参考窗口一侧。加密时,经过单色平面波照明以及透镜的傅里叶变换,在其后焦面上形成 JPS,也就是密文。为实现多图并行加密和任意图像再现功能,对 JTC 中的所有相位模板进行相位恢复迭代和相移处理^[19],实现频谱面上各通道 JPS 的区域分离,解决了多图像加密的联合功率谱串扰问题。

解密原理如图 1(b)所示。解密前,将密钥放置于输入面原位置处,位于第一块透镜的前焦面,并将密文置于第一块透镜的后焦面。相同波长的平面波照明输入面后,经过傅里叶变换,解密光束将与密文进行叠加,在第二块透镜的后焦面上出现对应的解密图像,从而实现任意图像再现功能。

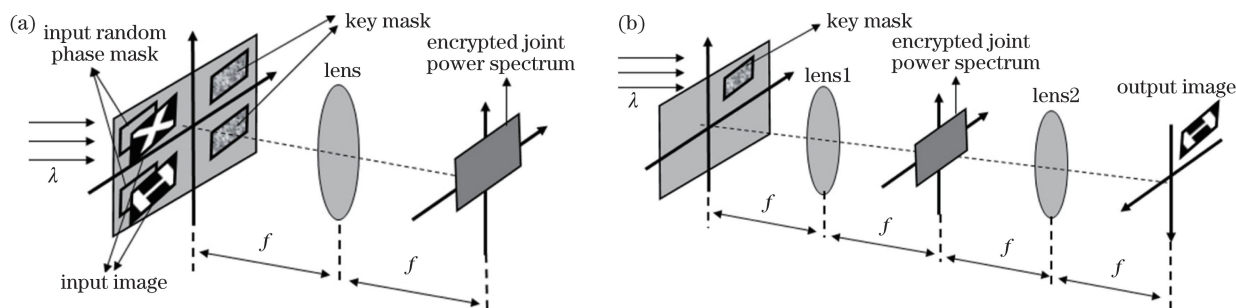


图 1 基于 JTC 的光学多图像并行加密系统原理图。(a)加密阶段;(b)解密阶段

Fig. 1 Schematic of parallel encryption for multi-channel images based on JTC.

(a) Encryption step; (b) decryption step

3 系统稳健性仿真与分析

光学加密系统稳健性通常从密文抗裁剪和噪声干扰能力两方面进行评价^[20-21]。

3.1 抗裁剪干扰性能仿真与分析

抗裁剪干扰分析通常以侧向裁剪和中间裁剪两种形式展开,基本模拟了密文传输过程中受到外来攻击或者密文信息自然丢失等干扰情况。仿真过程中,为了定量评估解密效果,引入解密图像与原始图像的相关系数(CC)作为评价指标^[22],即

$$X_{CC} = \frac{\left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \bar{f}][I(i,j) - \bar{I}] \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - \bar{I}]^2}}, \quad (1)$$

式中 i 和 j 分别表示在垂直和水平方向的像素位置, f 和 \bar{f} 分别表示待加密图像某像素点的灰度值和所有像素点灰度值的平均值, I 和 \bar{I} 分别表示解密图像某像素点的灰度值和所有像素点灰度值的平均值, M 和 N 分别代表图像在垂直和水平方向的总像素数。

仿真过程中,激光波长选取 632.8 nm,输入面各窗口尺寸均为 350 pixel×350 pixel,各窗口至水平坐标轴和垂直坐标轴之间的距离均为 200 pixel,透镜焦距选择 400 mm。图 2(a)~(c)分别为受到 10%、30%和 50%面积侧向裁剪后的密文信息。基于上述 3 组密文以及两组密钥,分别再现出图 2(d)~(f)所示的解密图像 pepper 以及图 2(g)~(i)所示的解密图像 boat。从两组图像解密效果来看,图像质量逐步变差,当 50%密文面积受到侧向裁剪后,两组图像的 CC 值分别下降到 0.42 和 0.21,解密图像内容难以辨别。图 3(a)~(c)分别为受到 10%、30%和 50%中间裁剪后的密文信息。基于此密文,图 3(d)~(f)所示图像的 CC 值分别为 0.47、0.25 和 0.25,图 3(g)~(i)所示图像的 CC 值分别为 0.43、0.21 和 0.21,图像解密效果很差。此外,解密图像 boat 在受到 30%侧向裁剪后,CC 值迅速下降到 0.4,图像已经难以辨别;解密图像 pepper 在受到相同密文面积裁剪后,CC 值下降到 0.81,图像仍然可以辨清。造成该现象的原因是由于图 2(a)~(c)中心区域的 JPS 由左、右两部分组成,其中左半部分为图像 boat 对应的 JPS,右半部分为图像 pepper 对应的 JPS,所以左侧裁剪会先影响图像 boat 的解密效果。

对上述仿真结果的分析发现,本文加密系统各通道 JPS 分布比较集中,仅占用整个密文的少部分空间,容易造成低比例密文裁切情况下部分通道图像信息的全部丢失,稳健性有待进一步优化。

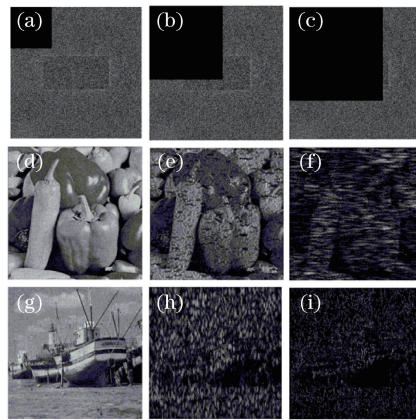


图 2 密文侧向裁剪后解密效果。(a) 10%裁剪密文;(b) 30%裁剪密文;(c) 50%裁剪密文;(d) $X_{CC}=0.98$ (10%裁剪);
(e) $X_{CC}=0.81$ (30%裁剪);(f) $X_{CC}=0.42$ (50%裁剪);(g) $X_{CC}=0.98$ (10%裁剪);
(h) $X_{CC}=0.4$ (30%裁剪);(i) $X_{CC}=0.21$ (50%裁剪)

Fig. 2 Decryption results based on ciphertext after side occlusion. (a) Ciphertext after 10% occlusion;
(b) ciphertext after 30% occlusion; (c) ciphertext after 50% occlusion; (d) $X_{CC}=0.98$ (10% occlusion);
(e) $X_{CC}=0.81$ (30% occlusion); (f) $X_{CC}=0.42$ (50% occlusion); (g) $X_{CC}=0.98$ (10% occlusion);
(h) $X_{CC}=0.4$ (30% occlusion); (i) $X_{CC}=0.21$ (50% occlusion)

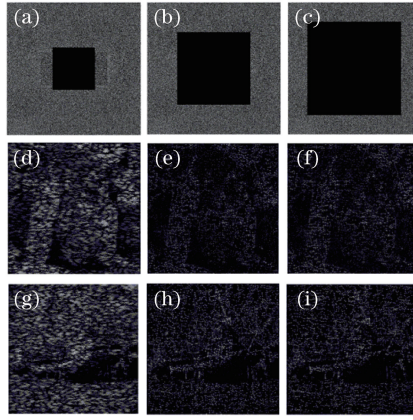


图 3 密文中间裁剪后解密效果。(a) 10%裁剪密文;(b) 30%裁剪密文;(c) 50%裁剪密文;(d) $X_{cc}=0.47$ (10%裁剪);
(e) $X_{cc}=0.25$ (30%裁剪);(f) $X_{cc}=0.25$ (50%裁剪);(g) $X_{cc}=0.43$ (10%裁剪);
(h) $X_{cc}=0.21$ (30%裁剪);(i) $X_{cc}=0.21$ (50%裁剪)

Fig. 3 Decryption results based on ciphertext after center occlusion. (a) Ciphertext after 10% occlusion;
(b) ciphertext after 30% occlusion; (c) ciphertext after 50% occlusion; (d) $X_{cc}=0.47$ (10% occlusion);
(e) $X_{cc}=0.25$ (30% occlusion); (f) $X_{cc}=0.25$ (50% occlusion); (g) $X_{cc}=0.43$ (10% occlusion);
(h) $X_{cc}=0.21$ (30% occlusion); (i) $X_{cc}=0.21$ (50% occlusion)

3.2 抗噪声干扰性能仿真与分析

噪声干扰是密文传输过程中遇到的较为常见的干扰形式,因此,抗噪声干扰性能分析是加密系统稳健性分析的重要内容之一。利用不同标准差 E_{RMS} 的随机噪声(均值为 0)作为噪声干扰源,对密文进行叠加干扰,通过 CC 值来定量评估不同 E_{RMS} 值噪声干扰下的解密效果,进而分析系统稳健性。

图 4(a)~(c)分别为受到 E_{RMS} 值为 0.1、0.3 和 0.5 随机噪声(均值为 0)干扰后的密文信息。基于上述密文以及两组密钥,分别再现出图 4(d)~(f)所示的解密图像 pepper 以及图 4(g)~(i)所示的解密图像 boat。虽然解密图像质量逐步变差,但是在 $E_{RMS}=0.5$ 的随机噪声干扰下,两组图像的 CC 值均能保持在 0.54 以上,解密图像依然可以辨别。

综上所述,本文加密系统在抗噪声干扰方面的稳健性较好。

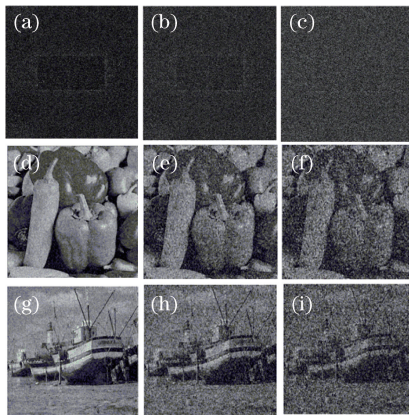


图 4 均值为 0 的随机噪声干扰后解密效果。(a)密文($E_{RMS}=0.1$);(b)密文($E_{RMS}=0.3$);(c)密文($E_{RMS}=0.5$);
(d) $X_{cc}=0.97$ ($E_{RMS}=0.1$);(e) $X_{cc}=0.82$ ($E_{RMS}=0.3$);(f) $X_{cc}=0.62$ ($E_{RMS}=0.5$);
(g) $X_{cc}=0.96$ ($E_{RMS}=0.1$);(h) $X_{cc}=0.77$ ($E_{RMS}=0.3$);(i) $X_{cc}=0.54$ ($E_{RMS}=0.5$)

Fig. 4 Decryption results based on ciphertext after noise attack when the mean value is 0.
(a) Ciphertext ($E_{RMS}=0.1$); (b) ciphertext ($E_{RMS}=0.3$); (c) ciphertext ($E_{RMS}=0.5$);
(d) $X_{cc}=0.97$ ($E_{RMS}=0.1$); (e) $X_{cc}=0.82$ ($E_{RMS}=0.3$); (f) $X_{cc}=0.62$ ($E_{RMS}=0.5$);
(g) $X_{cc}=0.96$ ($E_{RMS}=0.1$); (h) $X_{cc}=0.77$ ($E_{RMS}=0.3$); (i) $X_{cc}=0.54$ ($E_{RMS}=0.5$)

4 系统优化设计与仿真

4.1 系统优化设计方案

为解决仿真中发现的稳健性问题,提出一种 JPS 离散化配置方案,即通过相位恢复迭代算法实现单通道 JPS 的有间隔分布配置,也就是图 5(a)所示的通道 1 区域。在此算法基础上进行相移处理,即可形成图 5(a)所示的通道 2 区域,进而实现双通道 JPS 的镶嵌拼接,以确保在不溢出 CCD 光敏面的前提下,尽可能增大 JPS 面积以及分散程度,从而规避裁剪干扰下的图像信息全部丢失风险。图 5(a)为双通道 JPS 水平方向拼接策略;在此基础上进一步拓展设计,可以衍生出如图 5(b)所示的双通道 JPS 垂直方向拼接策略;图 5(c)为三通道 JPS 水平方向拼接策略;图 5(d)为四通道 JPS 二维拼接策略。

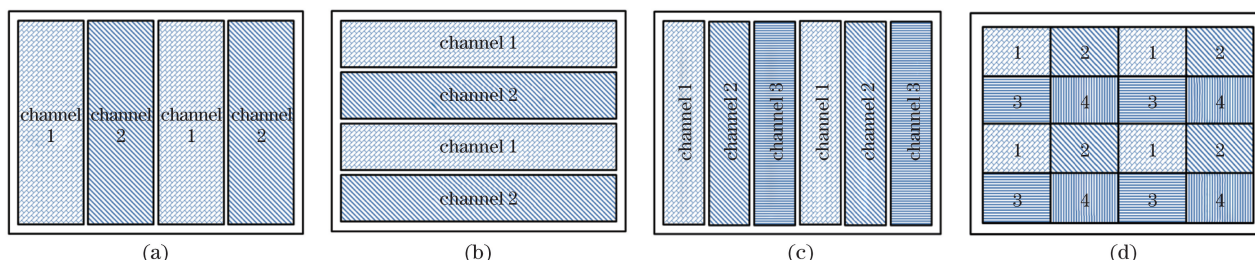


图 5 JPS 优化配置策略。(a)双通道水平方向拼接;(b)双通道垂直方向拼接;(c)三通道水平方向拼接;(d)四通道二维拼接

Fig. 5 Optimal strategy for JPS arrangement. (a) Splice in horizontal direction for dual channels;
 (b) splice in vertical direction for dual channels; (c) splice in horizontal direction for three channels;
 (d) two-dimensional splice for four channels

4.2 优化设计效果仿真

结合图 5(a)中的 JPS 优化配置策略,在检测优化后系统多图并行加密和任意图像再现基本功能的基础上,仿真分析其稳健性提升效果。

图 6(a)为优化后的 JPS 分布情况,其配置方法与图 5(a)一致;图 6(b)和图 6(c)分别为单个密钥解密出的对应图像,首先验证了新加密系统的任意图像再现功能。图 7(a)~(c)分别为侧向裁剪 10%、30%和 50%面积的密文;基于上述 3 组密文以及 2 组密钥,分别再现出图 7(d)~(i)所示的解密图像。比较图 2 中优化前各对应解密效果,解密图像质量得到有效提升;图 7(j)中的 2 组(4 条)曲线定量分析了优化前后 CC 值随密文裁剪比例增减的变化情况。由于优化前 pepper 对应的 JPS 处于密文右半侧,所以在小面积左侧裁剪情况下,CC 值相比优化后略高,但是随着裁剪面积逐渐变大,优化前的 CC 值迅速下降至 0.3 左右,而优化后的 CC 值缓慢下降,当裁剪面积达到 60%时,仍然保持在 0.7 左右,系统稳健性明显提升。

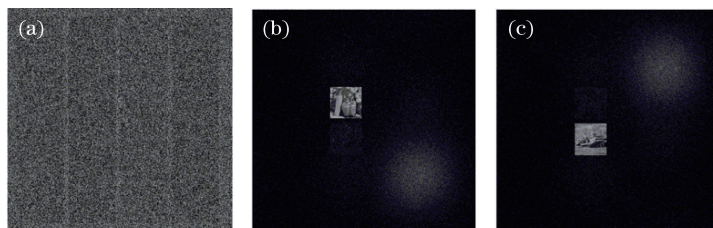


图 6 新加密系统解密效果。(a)优化后 JPS;(b)pepper 单钥解密效果;(c)boat 单钥解密效果

Fig. 6 Decryption results of optimized encryption system. (a) Optimized JPS; (b) decryption result of pepper with a single key;
 (c) decryption result of boat with a single key

图 8 分析方法与图 7 相似,主要对比了中间裁剪面积为 10%、30%和 50%情况下系统优化前后的解密效果。比较图 8(d)~(i)和图 3(d)~(i)在同等密文中间裁剪条件下的解密效果,可以发现,优化后的解密图像质量明显提高。图 8(j)为优化前后 CC 值与密文裁剪比例关系曲线,图中数据显示,系统稳健性得到明显提升。

此外,利用图 4 中的随机噪声干扰方法和噪声参数,对优化后的 CC 值进行数值仿真。结果发现,不同均值的随机噪声干扰对优化前后 CC 值的影响几乎一样,表明优化后系统在随机噪声干扰稳健性方面保持

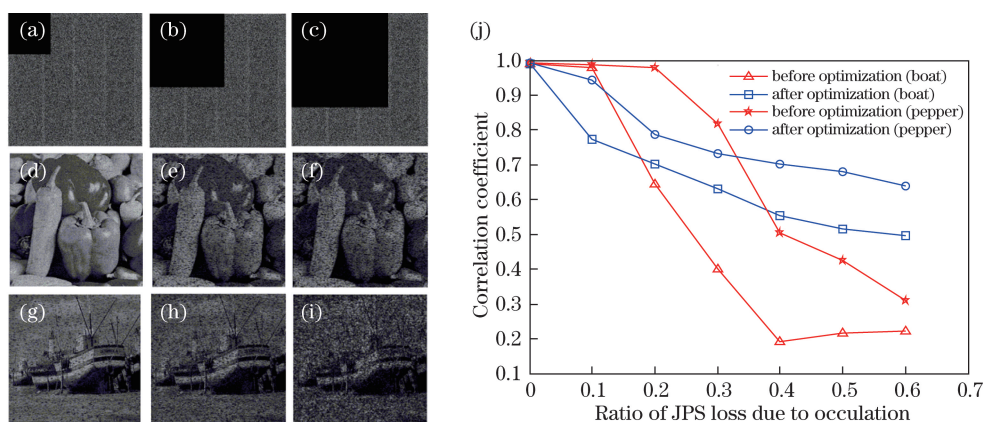


图 7 优化后密文侧向裁剪解密效果。(a) 10%裁剪密文;(b) 30%裁剪密文;(c) 50%裁剪密文;(d) $X_{cc}=0.94$ (10%裁剪);
(e) $X_{cc}=0.73$ (30%裁剪);(f) $X_{cc}=0.68$ (50%裁剪);(g) $X_{cc}=0.77$ (10%裁剪);
(h) $X_{cc}=0.63$ (30%裁剪);(i) $X_{cc}=0.52$ (50%裁剪);(j) 优化前后 CC 值与裁剪比例关系曲线

Fig. 7 Decryption results based on optimized ciphertext after side occlusion. (a) Ciphertext after 10% occlusion;
(b) ciphertext after 30% occlusion; (c) ciphertext after 50% occlusion; (d) $X_{cc}=0.94$ (10% occlusion);
(e) $X_{cc}=0.73$ (30% occlusion); (f) $X_{cc}=0.68$ (50% occlusion); (g) $X_{cc}=0.77$ (10% occlusion);
(h) $X_{cc}=0.63$ (30% occlusion); (i) $X_{cc}=0.52$ (50% occlusion);
(j) curves between the CC value and the occlusion ratio of JPS before and after optimization

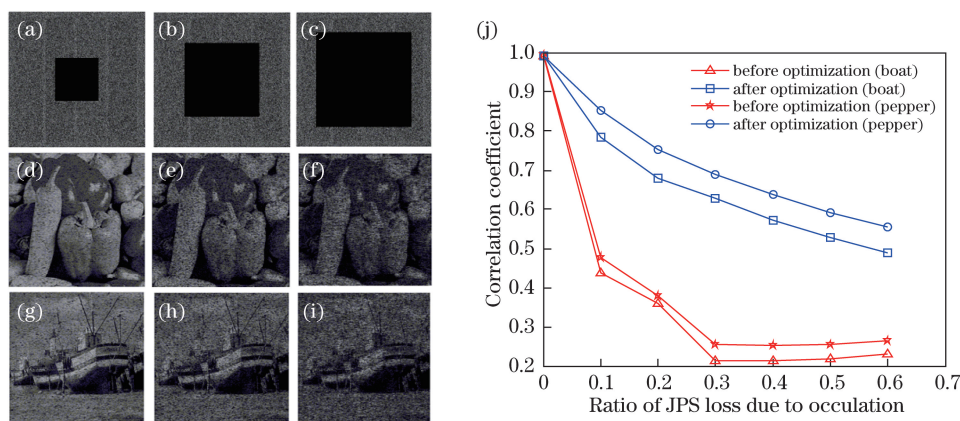


图 8 优化后密文中间裁剪解密效果。(a) 10%裁剪密文;(b) 30%裁剪密文;(c) 50%裁剪密文;
(d) $X_{cc}=0.85$ (10%裁剪);(e) $X_{cc}=0.69$ (30%裁剪);(f) $X_{cc}=0.59$ (50%裁剪);(g) $X_{cc}=0.78$ (10%裁剪);
(h) $X_{cc}=0.63$ (30%裁剪);(i) $X_{cc}=0.53$ (50%裁剪);(j) 优化前后 CC 值与裁剪比例关系曲线

Fig. 8 Decryption results based on optimized ciphertext after center occlusion. (a) Ciphertext after 10% occlusion;
(b) ciphertext after 30% occlusion; (c) ciphertext after 50% occlusion; (d) $X_{cc}=0.85$ (10% occlusion);
(e) $X_{cc}=0.69$ (30% occlusion); (f) $X_{cc}=0.59$ (50% occlusion); (g) $X_{cc}=0.78$ (10% occlusion);
(h) $X_{cc}=0.63$ (30% occlusion); (i) $X_{cc}=0.53$ (50% occlusion);
(j) curves between the CC value and the occlusion ratio of JPS before and after optimization

了原有系统的优势。

5 光学实验验证

为进一步验证系统稳健性提升方法的有效性,开展了新加密系统的稳健性分析光学实验研究,实验系统原理与组成如图 9、10 所示。激光器选择 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm;空间光调制器(SLM)选用 Holoeye PLUTO-VIS-014(纯相位反射式),空间分辨率为 1920 pixel×1080 pixel,像素尺寸为 8 μm;CCD 分辨率为 768 pixel×576 pixel,像素尺寸为 8.3 μm;透镜焦距为 400 mm。

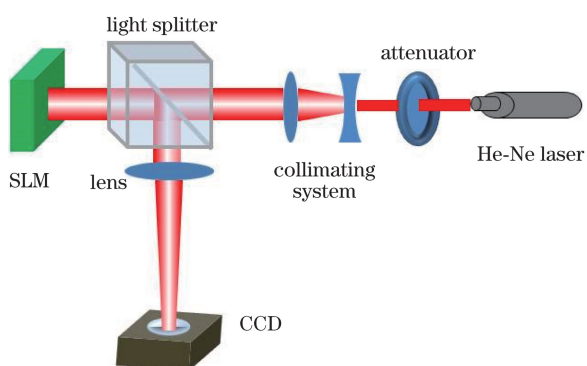


图 9 实验系统原理图

Fig. 9 Schematic of experimental system

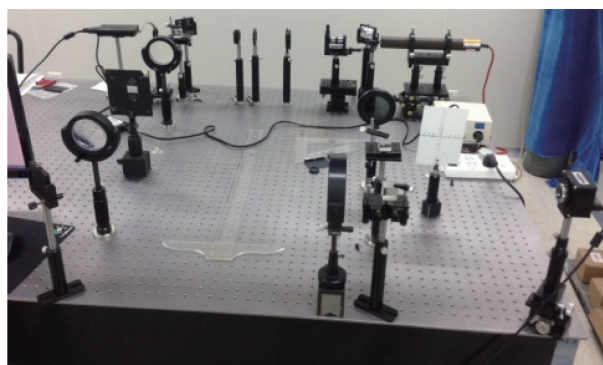


图 10 实验系统组成图

Fig. 10 Composition of experimental system

图 11(a)为利用相位恢复迭代算法和线性相移等处理方法生成的输入面,将其加载到 SLM 上;图 11(b)为 CCD 记录的优化后 JPC、信息。解密过程中,在实验系统内引入一路参考光来记录解密光束相位信息,后续步骤由数值解密方法完成。图 11(c)为同时解密的字符图像;图 11(d)~(e)为单个字符解密效果,验证其任意图像再现的基本功能。图 12(a)为优化前后未裁剪密文时同时解密的效果;图 12(b)~(d)分别为优化前后密文侧向裁剪 10%、30%和 50%面积后的解密效果。从解密效果变化趋势来看,优化后 CC 值下降较为平缓,裁剪 50%密文面积时,依然可见字符图像。图 13 是优化前后密文受到中间裁剪时的解密效果对比,优化后的解密图像质量明显由于优化前;图 14 是优化前后密文叠加不同 E_{RMS} 值时随机干扰噪声的解密效果对比。从实验结果来看,优化前后的解密图像质量变化趋势基本一致,尽管叠加的噪声干扰增强,图像内容依然清晰可辨。为增加光学实验样本以提高实验结果的可信度,继续开展了以数字为内容的光学图像加密稳健性实验。多组实验数据的统计与分析结果均与 4.2 节中仿真分析结果一致,进一步验证了所提出的系统优化设计方法的有效性。

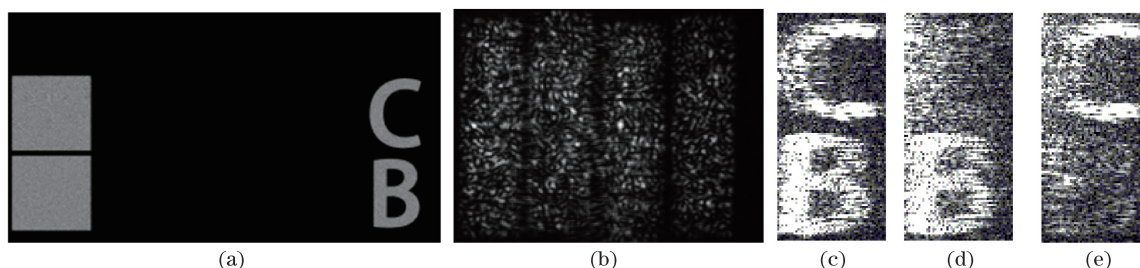


图 11 字符解密实验。(a)输入面;(b)优化后 JPS;(c)同时解密;(d)解密 B;(e)解密 C

Fig. 11 Decryption results of letters. (a) Input plane; (b) optimized JPS; (c) simultaneous decryption of two letters; (d) decryption of letter B; (e) decryption of letter C

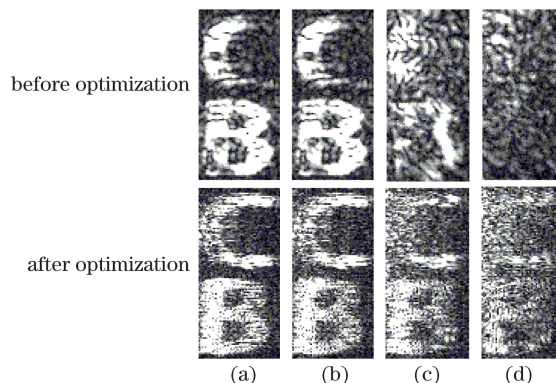


图 12 侧向裁剪解密效果。(a)未裁剪;(b)10%侧向裁剪;(c)30%侧向裁剪;(d)50%侧向裁剪

Fig. 12 Decryption results with side occlusion. (a) Without occlusion; (b) 10% side occlusion; (c) 30% side occlusion; (d) 50% side occlusion

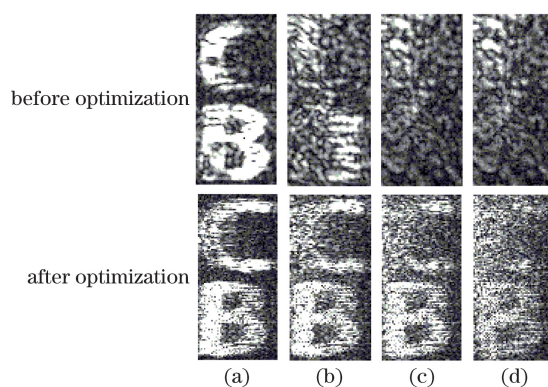


图 13 中间裁剪解密效果。(a)未裁剪;(b)10%中间裁剪;(c)30%中间裁剪;(d)50%中间裁剪
Fig. 13 Decryption results with center occlusion. (a) Without occlusion; (b) 10% center occlusion;
(c) 30% center occlusion; (d) 50% center occlusion

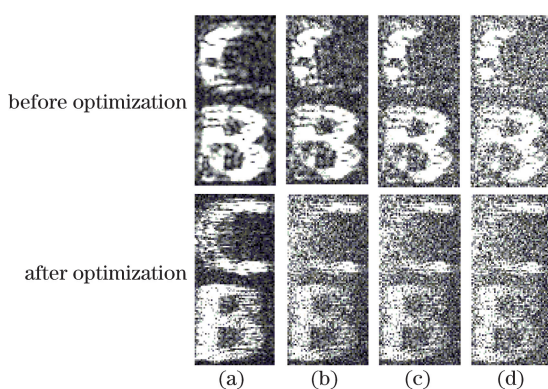


图 14 不同条件下噪声干扰解密效果。(a) $E_{RMS}=0$; (b) $E_{RMS}=0.1$; (c) $E_{RMS}=0.3$; (d) $E_{RMS}=0.5$
Fig. 14 Decryption results with noise attack under different conditions. (a) $E_{RMS}=0$;
(b) $E_{RMS}=0.1$; (c) $E_{RMS}=0.3$; (d) $E_{RMS}=0.5$

6 结 论

从密文抗裁剪和抗噪声干扰性能两个方面,对 JTC 光学多图像并行加密系统稳健性进行分析。通过数值仿真结果,发现该加密系统各通道 JPS 分布比较集中,仅占用整个密文的少部分空间,容易造成低比例密文裁切情况下部分通道图像信息的全部丢失。为提升系统稳健性,以 JPS 离散化配置为切入点,通过相位恢复迭代算法实现单通道 JPS 的有间隔分布配置,利用相移处理方法实现多通道 JPS 的镶嵌拼接,即可解决上述稳健性问题。通过对比优化前后仿真结果,发现密文裁剪比例增大时优化后 CC 值降低缓慢,并在高比例密文裁切情况下,依然可以辨清解密内容,系统稳健性得到明显提升。最后,搭建光学实验系统验证了优化设计方法的有效性,为今后开展光学多图像并行加密技术研究奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Refregier P, Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding[J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 767-769.
- [2] Situ G, Zhang J. Double random-phase encoding in the Fresnel domain[J]. Optics Letters, 2004, 29(14): 1584-1586.
- [3] Tajahuerce E, Javidi B. Encrypting three-dimensional information with digital holography[J]. Applied Optics, 2000, 39(35): 6595-6601.
- [4] Javidi B, Nomura T. Securing information by use of digital holography[J]. Optics Letters, 2000, 25(1): 28-30.
- [5] Zhou N R, Zhang A, Zheng F, *et al.* Novel image compression-encryption hybrid algorithm based on key-controlled measurement matrix in compressive sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 62(10): 152-160.
- [6] Liu Xiaoyong, Cao Yiping, Lu Pei. Research on optical image encryption technique with compressed sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0307002.

- 刘效勇, 曹益平, 卢佩. 基于压缩感知的光学图像加密技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0307002.
- [7] Zhou N R, Hua T X, Gong L H, *et al.* Quantum image encryption based on generalized Arnold transform and double random-phase encoding[J]. Quantum Information Processing, 2015, 14(4): 1193-1213.
- [8] Liang H R, Tao X Y, Zhou N R. Quantum image encryption based on generalized affine transform and logistic map[J]. Quantum Information Processing, 2016, 15(7): 2701-2724.
- [9] Nomura T, Javidi B. Optical encryption using a joint transform correlator architecture[J]. Optical Engineering, 2000, 39(8): 2031-2035.
- [10] Situ G, Zhang J. Multiple-image encryption by wavelength multiplexing[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1306-1308.
- [11] Amaya D, Tebaldi M, Torroba R, *et al.* Wavelength multiplexing encryption using joint transform correlator architecture[J]. Applied Optics, 2009, 48(11): 2099-2104.
- [12] Chang H T, Hwang H E, Lee C L, *et al.* Wavelength multiplexing multiple-image encryption using cascaded phase-only masks in the Fresnel transform domain[J]. Applied Optics, 2011, 50(5): 710-716.
- [13] Chen L F, Zhao D M. Optical color image encryption by wavelength multiplexing and lensless Fresnel transform holograms[J]. Optics Express, 2006, 14(19): 8552-8560.
- [14] Rueda E, Rios C, Henao R, *et al.* Experimental multiplexing approach via code key rotations under a joint transform correlator scheme[J]. Optics Communications, 2011, 284(10): 2500-2504.
- [15] Qin Yi, Lü Xiaodong, Gong Qiong, *et al.* Additional key rotation multiplexing encryption using joint transform correlator architecture[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0307002.
秦怡, 吕晓东, 巩琼, 等. 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[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0307002.
- [16] Barrera J, Henao R, Myrian T, *et al.* Multiplexing encrypted data by using polarized light[J]. Optics Communications, 2006, 260(1): 109-112.
- [17] Amaya D, Tebaldi M, Torroba R, *et al.* Multichanneled encryption via a joint transform correlator architecture[J]. Applied Optics, 2008, 47(31): 5903-5907.
- [18] Pan S M, Wen R H, Zhou Z H, *et al.* Optical multi-image encryption scheme based on discrete cosine transform and nonlinear fractional Mellin transform[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(2): 2933-2953.
- [19] Liu J, Bai T Z, Shen X J, *et al.* Parallel encryption for multi-channel images based on an optical joint transform correlator[J]. Optics Communications, 2017, 396: 174-184.
- [20] Sui L S, Duan K K, Liang J L, *et al.* Asymmetric double-image encryption based on cascaded discrete fractional random transform and logistic maps[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10605-10621.
- [21] Guo Q, Liu Z J, Liu S T. Color image encryption by using Arnold and discrete fractional random transforms in IHS space[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(12): 1174-1181.
- [22] Shen Xueju, Liu Xumin, Cai Ning. Nonlinear image encryption system based on JTC and its removing noise and resisting attack properties research[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0709003.
沈学举, 刘旭敏, 蔡宁. 非线性 JTC 光学图像加密系统及其消噪音和抗攻击特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0709003.