

一种具有安全特性的压缩全息成像方法

李 军^{1*}, 王尚媛¹, 李娇声², 雷 苗¹, 尹振兴², 唐志列¹

(1. 广东省量子工程和量子材料重点实验室//华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006;
2. 广东省纳米光子功能材料与器件重点实验室//华南师范大学信息光电子科技学院, 广州 510006)

摘要: 提出一种具有安全特性的压缩全息成像技术,用于解决全息成像应用中的安全问题.该方法可以在全息成像场景应用中同时实现光学加密、光学隐藏和光学压缩的功能,不仅能够保护图像的信息安全,又能实现对数据的压缩.首先,通过将主对象引入到经典 Mach-Zehnder 干涉仪的参考路径中,由此形成参考光场的二维空间分布.然后,将加密的物体图像嵌入到菲涅耳域目标光束和参考光束的相干成像过程的主目标信息中,实现图像的隐藏效果,从而达到对图像安全保护的目的.与此同时,由于采用压缩感知,具有安全特性的全息图被进一步压缩采样,单像素探测器只需记录较少数据即可表示原始成像对象.该方法大大减少了对象的数据采集量,可以在纯光学系统下安全地获得压缩对象,这是全息成像方法的一大进展,也有望突破全息影像在 3DTV、医学诊断、实时全息 TV 等领域中影像数据量受限的瓶颈.凭借全光学手段实现光学安全的可行性,对实现全光网络、近地和星际激光通信链路等应用具有重要的参考意义.

关键词: 图像处理; 压缩感知; 光学安全; 相干成像

中图分类号: TN26 文献标志码: A 文章编号: 1000-5463(2019) 03-0001-07

Compressive Holographic Imaging with Security Features

LI Jun^{1*}, WANG Shangyuan¹, LI Jiaosheng², LEI Miao¹, YIN Zhenxing², TANG Zhilie¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials//School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices//School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A compressive holographic imaging method with security features is proposed to solve the security problem in holographic imaging applications. This method can be used to achieve optical encryption, optical concealment and optical compression simultaneously in the application of holographic imaging, not only protecting the image information but also realizing data compression. First, the main object is introduced into the reference path of the classic Mach-Zehnder interferometer to form the two-dimensional spatial distribution of the reference light field. Then, the encrypted object image is embedded into the main target information of the coherent imaging of the Fresnel domain target beam and the reference beam to achieve the effect of image concealment. Meanwhile, with compressed sensing, the holograph with security features is further compressed and sampled, the single-pixel detector recording less data to represent the original imaging object. This method greatly reduces the amount of data of the object to be collected and can securely obtain the compressed object under the pure optical system. It is a major advance in holographic imaging method, and it is also expected to break through the bottleneck of holographic image data in 3DTV, medical diagnosis, real-time holographic TV and other fields. The feasibility of achieving optical security by all-optical means has important implication for the realization of all-optical networks, near-Earth and interstellar laser communication links.

Keywords: image processing; compressed sensing; optical security; coherent imaging

收稿日期: 2018-07-10

《华南师范大学学报(自然科学版)》网址: <http://journal.scnu.edu.cn/n>

基金项目: 国家自然科学基金项目(61672243); 广东省自然科学基金项目(2015A030313384); 广州市科技计划项目(201607010275)

* 通信作者: 李军, 副教授, Email: lijunc@126.com.

随着当今计算机技术的迅猛发展,由数字技术带来的媒体洪流引发了社会的巨变.但在信息愈加透明的今天,信息通信和传输过程中的安全性问题也愈发突出.数字图像作为信息和通信技术的主要载体之一,如果在网络中直接以明文形式传输,很容易被非法用户入侵和盗用,从而对组织和个人造成不可逆转的损害.因此,国内外学者对图像进行加密和隐藏等图像信息安全性的研究日益增多.传统的加密技术^[1-4]基于密码理论,将图像加密为不可读的加密文件.在不获取密钥的情况下,即使加密的图像信息被盗,也无法获得真实的信息^[5-6].但其传输过程将暴露双方的通信目的,引起第三方攻击者的注意,从而增加恶意攻击的风险.另一方面,图像隐藏和水印技术在宿主图像中嵌入秘密图像(或水印),使得包含 2 个图像的隐藏图像在某些区域中看起来像原始宿主图像.该方法可以达到隐藏秘密信息的目的,从而实现安全的信息存储和传输,避免窃听者的注意.目前,基于这 2 种集成图像安全技术的研究工作^[7-9]为数字领域的应用提供了更高的安全性.

近年来,将光信息的并行处理及高速操作和多维能力的特点运用到图像安全研究中已成为主要的研究趋势^[10].全息成像方法已经成为一个重要的研究课题^[11-14],并在现代光学领域已发展成为一个独立的分支,在相位物体和 3D 场景成像方面^[11,15],全息技术具有明显优势,且在生物医学成像^[16]、全息显微操作^[17]、显微镜^[18]、材料加工^[19]、全息显微镜^[20]、冷原子成像^[21]等领域具有广泛的应用前景.然而,用于存储或传输全息图的巨大数据量一直是限制光学图像应用安全的主要因素.由 DONOHO 研究组^[22-23]提出了压缩感知理论,在远低于奈奎斯特采样条件下,仅通过 1 个线性投影矩阵即可重构出原信号,为光学全息压缩技术提供了新的思路^[24].一些基于压缩感知的图像安全研究应运而生^[25-28],然而这些研究方法主要通过电学方式实现,而且多数情况仅对图像进行加密处理保证其安全性.由于电学方法的特性,这些方法大都是先将图像信息采集到计算机,之后才对图像进行安全处理,这种方式仍然无法保证图像信息收集过程中的安全问题.

本文提出了一种具有安全特性的压缩全息成像技术,解决存在于全息成像方面的安全挑战,提供了一个新颖的具有特定功能的成像思路.该技术能够在全息成像过程中同时实现对光学图像的保护(加

密及隐藏)和光学压缩功能.在传统的马赫-增德尔干涉仪的基础上,保持物体光路不变,引入宿主物体到参考光路,实现参考波的空间调制,形成二维空间分布的参考光束场.因此,在菲涅尔域下物体光束和参考光束的相干成像过程中,成像物体信息可以被加密并且隐藏到宿主物体信息当中.根据压缩感知原理,利用信号的稀疏性,加密和隐藏的对象被压缩为更少的数据,使用单光子探测器在接收终端捕获经加密、隐藏和压缩的对象信息.该方法可以在纯光学系统下安全地获得压缩对象,这是全息成像方法的一大突破,并且大大减少了使对象恢复所需的测量次数.同时,使用单光子探测器的成像方法容易与其他特殊的成像方法结合,从而在量子成像^[29]、光子计数成像^[30]、不同波段的相干波成像^[31]等领域具有广泛应用.该方法也是解决信息技术发展下透明信息安全问题的有效方案之一.由于该方法可在光域实现,因此它有望被应用于近地和星际激光通信链路中^[32].

1 研究方法

具有安全特性的压缩全息成像系统主要由激光器(Laser)、扩束器(BE)、分束器(BS)、反射镜(M)、透镜(Lens)、双随机相位板(R_1 、 R_2)、压电转换器(PZT)、数字微镜阵列(DMD)、光电探测器(Photodiode)组成(图 1).其中,双随机相位板为加密部件,实现对物体信息的加密处理;宿主图像(O_h)为加密处理后的物体图像载体,实现隐藏效果;图中 O_c 为原始图像.

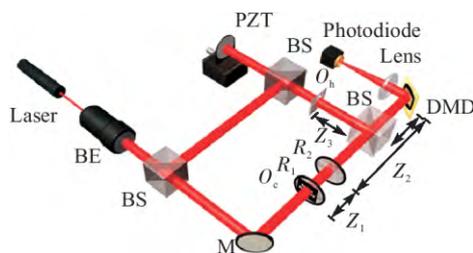


图 1 具有安全特性的压缩全息成像系统架构图

Figure 1 The setup of compressive holographic imaging system with security features

1 束线性偏振激光经过扩束、准直后被分束器分为 2 束:其中一束光经平面镜反射到实验物体(称该光为物光),物光通过 2 个随机相位板 R_1 和 R_2 ,使用双随机相位编码^[1]技术可以实现图像加密

功能;另一束光称为参考光,在参考光路上,压电换能器具有产生相移的作用.实验中分别使用 0 、 $\pi/2$ 、 π 的相移.不同相移下的参考光分别通过宿主物体,参考光经宿主图像调制,使光场不再是传统马赫-增德尔干涉仪下均匀分布的光场.物光和参考光在另一分束器处汇合.2束光经过分束器后,在输出面处干涉叠加形成全息图(I_H)并被数字微镜阵列(DMD)记录.通过计算 I_H 和 DMD 上的测量矩阵(Φ)获得压缩采样数据,通过一个单像素探测器收集这些采样数据.最后利用传统的通信通道获得压缩全息图像,经过特定的重建算法进行图像重构.原始图像由菲涅耳反变换在相应的光学系统参数下重构出来.

1.1 压缩、加密和隐藏处理

在上述实验系统中,假设物光和参考光通路的光振幅分别为常数 K_1 、 K_2 .物体图像和宿主图像的透射比分别为 $O(x_0, y_0)$ 和 $h(x_0, y_0)$.双随机相位板的复振幅透射比(R_1 和 R_2)分别为

$$R_1 = \exp[i2\pi \cdot p(x_0, y_0)],$$

$$R_2 = \exp[i2\pi \cdot q(x_1, y_1)],$$

其中 $p(x_0, y_0)$ 和 $q(x_1, y_1)$ 均为一致分布在 $[0, 1]$ 上独立的白噪声. R_1 和 R_2 之间的距离为 Z_1 , R_2 和 DMD 之间的距离为 Z_2 , 宿主图像到 DMD 之间的距离为 Z_3 .

在菲涅耳域下,物体图像利用双随机相位编码技术实现图像加密效果,因此, DMD 上来自物光光路的复杂分布为

$$\Psi_0(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) \exp(i\varphi(\xi, \eta)) = \text{Frt}_{z_2}\{\text{Frt}_{z_1}\{K_1 \times O(x_0, y_0) \exp[i2\pi \cdot p(x_0, y_0)]\} \times \exp[i2\pi \cdot q(x_1, y_1)]\}, \quad (1)$$

其中, Frt_z 代表在距离 z 的菲涅耳变换. DMD 上来自参考光路的复杂分布:

$$\Psi_h(\xi, \eta; \varphi_R) = A_h(\xi, \eta) \exp[i\varphi_h(\xi, \eta)] \exp(i\varphi_R) \quad (\varphi_R = 0, \pi/2, \pi), \quad (2)$$

其中, φ_R 表示相移 25、26. DMD 上最终的干涉强度为:

$$I_H(\xi, \eta; \varphi_R) = |\Psi_0(\xi, \eta) + \Psi_h(\xi, \eta; \varphi_R)|^2 = A(\xi, \eta)^2 + A_h(\xi, \eta)^2 + 2A(\xi, \eta)A_h(\xi, \eta) \times \cos[\varphi_h(\xi, \eta) + \varphi_R - \varphi(\xi, \eta)] \quad (\varphi_R = 0, \pi/2, \pi), \quad (3)$$

DMD 实际上是一个空间光调制器(SLM),它相当于一个随机测量矩阵.根据压缩感知中的受限等距性, DMD 的微小镜片处于一个特定的伪随机状态.由随

机数字发生器(RNG)来控制每个微镜片的方向,使它们可以在水平方向上发生 $\pm 12^\circ$ 的偏转. -12° 偏转对应的图像没有被反射到光电二极管上, $+12^\circ$ 偏转的图像则可被反射到光电二极管上.计算这些测量值作为输出电压

$$Y(m) = \{y_{1m}, y_{2m}, y_{3m}\} = \varphi_m [I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}], \quad (4)$$

其中 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$, φ_m 是 DMD 上 m 维的伪随机测量矩阵.执行该处理过程 M 次,可获得测量值

$$Y = [y_1, y_2, y_3] = \Psi [I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}], \quad (5)$$

其中,

$$[I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}] = \begin{bmatrix} I_{H11} & I_{H21} & I_{H31} \\ I_{H12} & I_{H22} & I_{H32} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{H1N} & I_{H2N} & I_{H3N} \end{bmatrix};$$

$\Psi \in R^{M \times N}$ 是 DMD 产生的测量矩阵, $Y \in R^{M \times 3}$ 是测量数据, $y_k \in R^{M \times 1}$, $I_{Hk} \in R^{N \times 1}$.

1.2 图像重建过程

使用光电二极管使光信号转换为数字信号,通过传统的通道传输到计算机,在计算机上实现图像重建过程.采用两步迭代算法^[33](即 TwIST 算法)恢复原始图像,算法如下:

$$\min_{I_{Hk}} \frac{\mu}{2} \|Y_k - \varphi I_{Hk}\|_2^2 + TV(\hat{I}_{Hk}) \quad s.t. \quad Y_k = \Psi I_{Hk}, \quad (6)$$

其中, μ 是常数;等号左边第 1 项是最小二乘项,当 \hat{I}_{Hk} 与相关向量 Y_k 一致时,该项很小;等号左边第 2 项是信号的全变分,且

$$TV(\hat{I}_{Hk}) = \sum_{adj, i, j} |\hat{I}_{Hki} - \hat{I}_{Hkj}|, \quad (7)$$

其中,指数 i, j 遍历所有相邻的像素点.结合 3 个不同相移,可以得到 3 个干涉图,由图 1 中的参数可以计算:

$$\phi(\xi, \eta) = \tan^{-1} \frac{2\hat{I}_{H2} - \hat{I}_{H1} - \hat{I}_{H3}}{\hat{I}_{H1} - \hat{I}_{H3}} + \phi_h(\xi, \eta),$$

$$A(\xi, \eta) = \frac{[(\hat{I}_{H1} - \hat{I}_{H3})^2 + (2\hat{I}_{H2} - \hat{I}_{H1} - \hat{I}_{H3})^2]^{1/2}}{4A_h}, \quad (8)$$

其中, φ_h 、 A_h 是宿主图像的衍射分布,通过马赫-增德尔干涉仪下的三步相移全息可得 φ_h 、 A_h 的值.接着进行菲涅耳反变换,即可恢复原始图像:

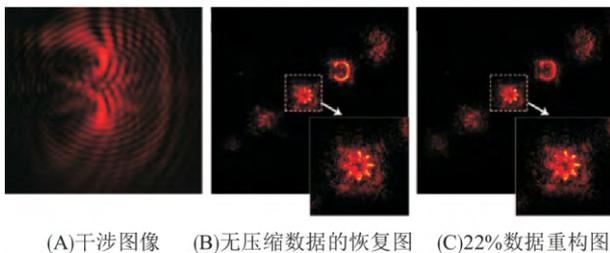
$$O(x_0, y_0) = \text{IFrt}_{z_{21}}\{\text{IFrt}_{z_{22}}\{A(\xi, \eta) \exp(j\phi(\xi, \eta))\} \times \exp[-i2\pi \cdot q(x_1, y_1)]\} \times \exp[-i2\pi \cdot p(x_0, y_0)], \quad (9)$$

其中 JF_{rt} 代表菲涅耳反变换.

2 结果与讨论

2.1 实验结果分析

为了验证在参考光路中加入宿主图像实现的图像隐藏效果,在具有安全特性的压缩全息成像系统架构(图 1)中,去除物光通路的双随机相位板 R_1 和 R_2 ,以此研究宿主图像的隐藏效果.成像实验中的宿主图像“C”和太阳形状的物体图像来源于 OFFICE2003,两者尺寸大小分别为 $0.4\text{ cm}\times 0.3\text{ cm}$ 和 $0.5568\text{ cm}\times 0.5952\text{ cm}$.在该系统中,电光相位调制器采用型号为 HOLOEYELC2002 的空间光调制器,其最大像素点为 $800(\text{H})\times 600(\text{V})$,像素间距为 $32\text{ }\mu\text{m}$.实验中的激光选用波长为 632.8 nm 的氦氖激光,物光和参考光两者的振幅比为 $0.1:1$.在参考光路引入 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 的中性密度滤波片产生相移.物体图像和宿主图像的记录距离分别为 0.7680 m 和 1.0040 cm .实验中使用 $1024\text{ px}\times 1024\text{ px}\times 22\%$ 的隐藏图像测量数据.对压缩隐藏的图像进行重建,图 2A 为原始图像隐藏与宿主图像的干涉图形;图 2B 表示从没有压缩的数据中恢复的原始图像;图 2C 为利用本文系统采用数据量为 22% 的测量数据得到的重建图像.对比图 2B、C 的重建效果可以看出,使用数据量 22% 的测量数据与 100% 的数据(无压缩)重构的原始图像基本相同.实验结果初步证明该压缩全息成像系统能够实现图像的隐藏功能.



(A)干涉图像 (B)无压缩数据的恢复图 (C)22%数据重构图

图 2 具有隐藏功能的成像实验结果

Figure 2 The experimental results of the imaging system with concealing function

采用一系列实验来证明该系统的隐藏效果,并用峰值信噪比(PSNR)来衡量图像重建的精确性.原始图像及重建图像之间的峰值信噪比 PSNR 与采样率 r 的关系如图 3 所示,PSNR 随着采样率的增加而增大,该系统实验中 $\text{PSNR}>26\text{ dB}$.当采样率达到 35% 时,PSNR 接近 30 dB ,这充分证明了该方案有效.

进一步通过仿真实验验证该方法实现加密和隐

藏的效果.在图 4A、B 中,图像均为 $256\text{ px}\times 256\text{ px}$.氦氖激光波长为 632.8 nm ,物光和参考光振幅比为 $0.000001:1$.在图 1 的光路中 Z_1 、 Z_2 的取值分别为 0.1 、 0.2 m ,宿主图像的衍射距离 $Z_3=0.3\text{ m}$.使用 $256\text{ px}\times 256\text{ px}\times 54.2\%$ 的加密隐藏图像的测量数据进行图像重建,利用加密隐藏图像的压缩数据,结合正确的密码和光学系统参数能实现对原始图像的准确恢复.实验仿真结果证明,在非涅耳域的纯光学方案中,本文提出的具有安全特性的压缩全息成像系统是切实可行的.

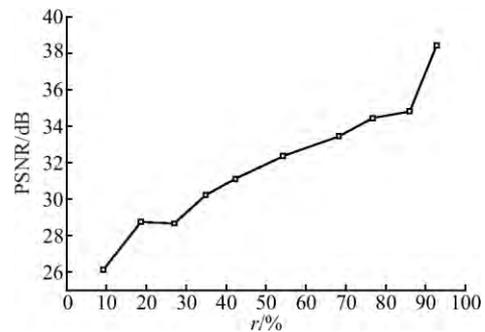


图 3 具有隐藏功能的成像系统中功率信噪比与采样率的关系

Figure 3 The relationship of PSNR and the sampling rate in the imaging system with concealing function



(A)原始图像 (B)宿主图像 (C)加密隐藏的全息图



(D)无压缩数据重构图像 (E)54.2%测量数据重构图像

图 4 具有加密和隐藏功能成像系统的仿真结果

Figure 4 The computer simulation results of the imaging system with functions of encryption and concealment

2.2 鲁棒性分析

采用一系列仿真实验充分验证本文方法的鲁棒性.首先,在干涉仪中采用压缩比率参数 $q=95\%$ 的 JPEG 进行压缩攻击,得到其中的一个干涉图和相应的重构图(图 5A);其次,对干涉图像逆时针旋转 0.5° 得到受旋转攻击的干涉图和相应的重构图(图

5B). 实验结果表明, 该方法对压缩及旋转攻击具有一定的鲁棒性.

为了测试系统应对滤波器攻击的效果, 分别使用了窗口大小均为 3×3 的低通高斯滤波器和高通

高斯滤波器. 在 2 种滤波器下, 其中一幅过滤干涉图和对应的重构图像如图 6 所示. 这些结果显然证明该方法具有良好的鲁棒性, 能很好地应对各种常见的扭曲和攻击噪声.

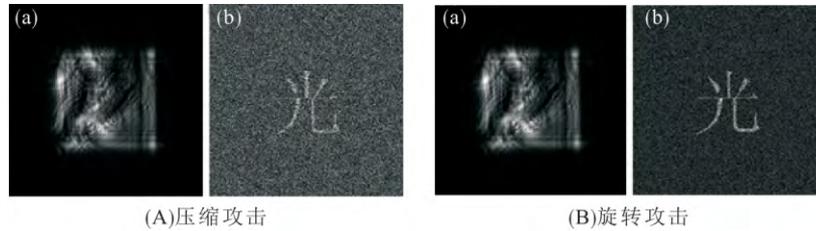


图 5 对抗 JPEG 压缩攻击、旋转攻击的鲁棒性

Figure 5 The robustness of this method against JPEG compression and rotation attack

注: (a) 为干涉图; (b) 为重构图.

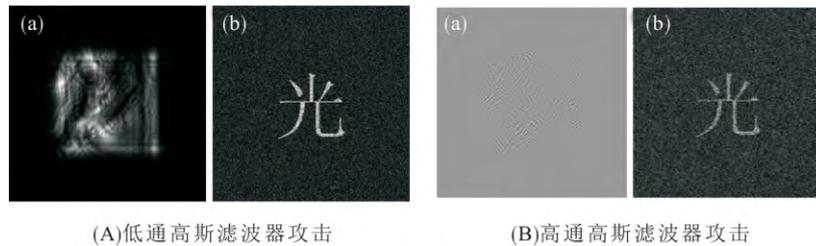


图 6 对抗低、高通高斯滤波器攻击的鲁棒性

Figure 6 The robustness of this method against low- and high-pass filters attack

注: (a) 为干涉图; (b) 为重构图.

使用相关系数 (CC) 将获得的图像与原始图像进行对比, 来评估在各种常见的扭曲和攻击噪声干扰下重建图像的恢复效果. 相关系数定义为

$$CC = \frac{\text{cov}(O', O)}{\sigma_{O'} \cdot \sigma_O}, \quad (10)$$

其中, O' 和 O 分别代表获得的图像与原始图像, $\sigma_{O'}$ 和 σ_O 是 O' 和 O 的标准偏差, $\text{cov}(O', O)$ 为 2 个相应图像的协方差. 不同强度下扭曲和攻击的 CC 曲线见图 7. 由相关系数相对于图像压缩比的变化曲线(图 7A)可知, 随着压缩比的增加, CC 逐渐增大. 因为压缩比越小, 压缩过程中引入干涉图的损伤作用也越小. 从 0° 到 1° 逆时针旋转干涉图(图 7B), CC 随着旋转角度的增加而逐渐下降. CC 相对于

低、高通滤波器窗口尺寸的变化中, 低通滤波器曲线在初始时大幅下降(图 7C), 但是在滤波器的窗口尺寸增加 2×2 时, CC 保持恒定, 不再随窗口尺寸的改变而变化; 然而对于高通滤波器的情况, CC 随着高通滤波器窗口尺寸的增加逐渐上升(图 7D). 这表明在图像重构过程中, 干涉图中的低频信息比高频信息更有用. 因此, 该方法针对各种常见攻击具有良好的鲁棒性. 由于在 JPEG 压缩和旋转角度攻击这 2 种情况下, 相对轻微的攻击就使得 CC 下降到一个很小的值, 而在 2 种滤波器的任何攻击强度下, CC 均大于 0.98. 总之, JPEG 压缩和旋转角度攻击比滤波器攻击更敏感.

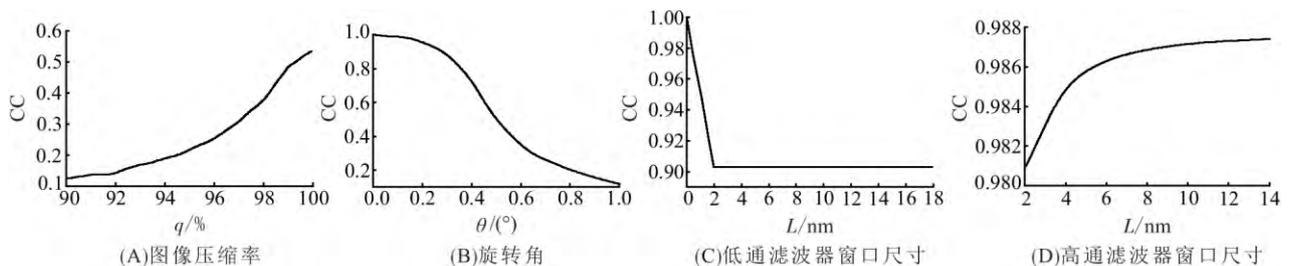


图 7 不同强度下对同一幅图像的攻击曲线

Figure 7 The curves of CC versus different intensities of some common image distortions and attacks

3 结论

提出了基于修正马赫-增德尔干涉仪的具有安全特性的压缩全息成像技术. 该方法能够在全息成像过程中同时实现光学加密、隐藏和光学压缩功能. 在对全息图实现信息保护的同时, 仅使用 22% 的测量数据即可重构原始图像, 并能得到很好的实验效果. 在该架构中 DMD 能够实现高速测量^[34], 系统的实时性能大幅提高. 为了进一步完善系统, 在接收终端, 可以使用超导纳米单光子探测器^[30] 取代光电二极管来捕获测量数据. 使用该方法可以在成像处理中安全地获得 3D 图像, 因此该系统能获得高敏感的成像并且突破了弱光环境下阵列成像的限制. 该技术可被应用于生物医学成像、航空成像、微弱信号探测等方面, 也有望突破 3DTV^[35] 等大数据量全息图的局限性, 并提高成像分辨率的波长范围. 此外, 根据不同的传感器和波长, 该方案能实现三维场景的安全获取.

参考文献:

- [1] JAVIDI B, REFREGIER P. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(7): 767-769.
- [2] SINGH N, SINHA A. Optical image encryption using fractional Fourier transform and chaos [J]. *Optics & Lasers in Engineering* 2008, 46(2): 117-123.
- [3] UNNIKRISHNAN G, JOSEPH J, SINGH K. Optical encryption by double-random phase encoding in the fractional Fourier domain [J]. *Optics Letters* 2000, 25(12): 887-889.
- [4] PENG X, ZHANG P, WEI H, et al. Known-plaintext attack on optical encryption based on double random phase keys [J]. *Optics Letters* 2006, 31(8): 1044-1046.
- [5] CHEN W, JAVIDI B, CHEN X. Advances in optical security systems [J]. *Advances in Optics & Photonics* 2014, 6(6): 120-155.
- [6] MEHRA I, NISHCHAL N K. Image fusion using wavelet transform and its application to asymmetric cryptosystem and hiding [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5474-5482.
- [7] HE M Z, CAI L Z, LIU Q, et al. Phase-only encryption and watermarking based on phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics* 2005, 44(13): 2600-2606.
- [8] CHUANG C H. Steganographic optical image encryption system based on reversible data hiding and double random phase encoding [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 08201/1-11.
- [9] ZHANG W, MA K, YU N. Reversibility improved data hiding in encrypted images [J]. *Signal Processing* 2014, 94(1): 118-127.
- [10] LI J, ZHENG T, LIU Q Z, et al. Double-image encryption on joint transform correlator using two-step-only quadrature phase-shifting digital holography [J]. *Optics Communications* 2012, 285(7): 1704-1709.
- [11] BLANCHE P A, BABLUMIAN A, VOORAKARANAM R, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer [J]. *Nature*, 2010, 468: 80-83.
- [12] JAVIDI B, NOMURA T. Securing information by use of digital holography [J]. *Optics Letters* 2000, 25(1): 28-30.
- [13] LEE G Y, YOON G, LEE S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces [J]. *Nanoscale* 2018, 10(9): 4237-4245.
- [14] WANG D, WANG F, ZHAO J, et al. Hybrid in-line and off-axis digital holography with single-shot dual-wavelength [C]//3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications. Florida: OSA Publishing, 2018.
- [15] FRAUEL Y, NAUGHTON T J, MATOBA O, et al. Three-dimensional imaging and processing using computational holographic imaging [J]. *Proceedings of the IEEE* 2006, 94(3): 636-653.
- [16] KEMPER B, VOLLMER A, ROMMEL C E, et al. Simplified approach for quantitative digital holographic phase contrast imaging of living cells [J]. *Journal of Biomedical Optics* 2011, 16(2): 026014/1-4.
- [17] DANESH PANAH M, ZWICK S, SCHAAL F, et al. 3D holographic imaging and trapping for non-invasive cell identification and tracking [J]. *Journal of Display Technology* 2010, 6(10): 490-499.
- [18] DING H, POPESCU G. Instantaneous spatial light interference microscopy [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1569-1575.
- [19] HASEGAWA S, HAYASAKI Y, NISHIDA N. Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses [J]. *Technical Report of IEICE LQE*, 2006, 105(11): 1705-1707.
- [20] JUNG J, KIM K, YU H, et al. Biomedical applications of

- holographic microspectroscopy [J]. *Applied Optics* ,2014 ,53(27) : 111-122.
- [21] SOBOL J P ,WU S. Imaging cold atoms with shot-noise and diffraction limited holography [J]. *New Journal of Physics* ,2014 ,16(9) : 093064/1-15.
- [22] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory* ,2006 ,52(4) : 1289-1306.
- [23] ABOLBASHARI M ,FARAHI F. High-resolution hyperspectral single-pixel imaging system based on compressive sensing [J]. *Optical Engineering* ,2012 ,51(7) : 397-407.
- [24] 李科 李军. 基于压缩传感的全息图压缩研究 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)* ,2012(4) : 61-65.
LI K ,LI J. Hologram compression based on compressive sensing [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)* ,2012(4) : 61-65.
- [25] LIU X ,MEI W ,DU H. Optical image encryption based on compressive sensing and chaos in the fractional Fourier domain [J]. *Journal of Modern Optics* ,2014 ,61(19) : 1570-1577.
- [26] CHAI X ,GAN Z ,CHEN Y ,et al. A visually secure image encryption scheme based on compressive sensing [J]. *Signal Processing* ,2017 ,134: 35-51.
- [27] ZHOU N ,LI H ,WANG D ,et al. Image compression and encryption scheme based on 2D compressive sensing and fractional Mellin transform [J]. *Optics Communications* ,2015 ,343: 10-21.
- [28] ZHOU N ,PAN S ,CHENG S ,et al. Image compression-encryption scheme based on hyper-chaotic system and 2D compressive sensing [J]. *Optics & Laser Technology* ,2016 ,82: 121-133.
- [29] KATZ O ,BROMBERG Y ,SILBERBERG Y. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters* ,2009 ,95: 131110/1-4.
- [30] MOHAN N ,MINAEVA O ,GOL'TSMAN G N ,et al. Photon-counting optical coherence-domain reflectometry using superconducting single-photon detectors [J]. *Optics Express* ,2008 ,16(22) : 18118/1-30.
- [31] CHAPMAN H N ,NUGENT K A. Coherent lensless X-ray imaging [J]. *Nature Photonics* ,2010 ,4(4) : 833-839.
- [32] HEMMATI H ,BISWAS A ,DJORDJEVIC I B. Deep-space optical communications: future perspectives and applications [J]. *Proceedings of the IEEE* ,2011 ,99(11) : 2020-2039.
- [33] BIOUCAS - DIAS J M ,FIGUEIREDO M A T. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing* ,2007 ,16(12) : 2992-3004.
- [34] YU W K ,LIU X F ,YAO X R ,et al. Complementary compressive imaging for the telescopic system [J]. *Scientific Reports* ,2014 ,4(4) : 5834/1-6.
- [35] NEHMETALLAH G ,BANERJEE P P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging [J]. *Advances in Optics & Photonics* ,2012 ,4(4) : 472-553.
- 【责任编辑: 谭春林 责任校对: 谭春林 英文审校: 程杰】