

全光学压缩光学图像隐藏技术

李 军, 陈思佳, 雷 苗, 李娇声, 李 榕, 唐志列

华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006

摘要 近年来, 三维(3D)成像技术因其逼真的观感而广受关注, 随之而来的 3D 图像的安全问题也逐渐被重视。由于 3D 图像的数据量非常庞大, 导致数据传输处理速度缓慢, 因此如何快速并安全地传输处理 3D 图像成为了首要的问题。提出了一种凭借全光学手段实现压缩光学图像隐藏技术, 利用光学技术的并行性以及压缩感知理论大大减少了采集时间和采集数据量, 为未来实现 3D 图像安全传输提供可能。首先通过使用改进的马赫-曾德尔干涉仪将秘密图像嵌入到宿主图像中实现图像隐藏, 再利用单像素相机实现全息压缩成像, 将隐藏图像的采集数据压缩到更小。在接收端, 通过压缩感知理论和指定的全息重建算法, 很好地恢复了秘密图像。仿真和初步实验结果表明, 使用全光学手段并应用压缩感知理论能够大大减少全息图数据采集量, 证明了本方案可安全高效地在全光网络中实现光学图像传输。

关键词 图像处理; 光学图像隐藏; 压缩感知; 全息干涉测量; 相干成像

中图分类号 TN26 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.11110003

A Fully Optical Method for Compressive Optical Image Hiding

Li Jun, Chen Sijia, Lei Miao, Li Jiaosheng, Li Rong, Tang Zhilie

School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,

Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Recently, because of its realistic perception, the three-dimensional (3D) imaging technology has attracted more and more attention, and the consequent security issues of 3D image are gradually being taken seriously. Because of the huge data volume of 3D image, the speed of data transmission and processing is very slow. The safety and speed of 3D images transmission has become the primary problem. An optical image hiding technique using fully optical means is proposed, which utilizes the parallelism of optical technology and the theory of compressive sensing to greatly reduce the acquisition time and data volume, it provides the possibility of future 3D image secure transmission. Firstly a secret scene or image is embedded into a host image to perform optical image hiding by using a modified Mach-Zehnder interferometer. Then the hidden image is compressed to a much smaller signal data using single-pixel holographic compression imaging. At the received terminal, the hidden image is reconstructed well via compressive sensing theory and a specified holographic reconstruction algorithm. The preliminary experimental results and numerical simulations show that it is effective and suitable for optical image security transmission in the coming all-optical network for the reason of the completely optical implementation and largely decreased holograms data volume.

Key words image processing; optical image hiding; compressive sensing; holographic interferometry; coherent imaging

OCIS codes 100.3010; 060.4785; 070.4560; 090.1995; 120.2880

1 引 言

随着计算机网络和多媒体的迅猛发展与普及, 全球各地的用户逐渐习惯运用网络传递和分享大量信息。数字图像作为信息的重要载体, 在政治、军事、医疗等领域有着广泛的应用^[1]。如果秘密图像信息在网络中

收稿日期: 2017-05-18; **收到修改稿日期:** 2017-06-26

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

作者简介: 李 军(1972—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光学图像安全、压缩成像、全息成像等方面的研究。

E-mail: lijunc@126.com

公开传递,则无法保护其安全,极易被网络上的非授权用户窃取,从而对个人、公司、社会及国家造成危害^[2]。因此,图像信息的安全研究逐渐受到国内外的广泛关注。图像安全研究包括图像加密、图像隐藏和图像水印^[3-7]。传统的图像加密技术虽然可将图像加密为不可用信息,在未获取密钥的情况下,即使窃取到加密的图像信息也无法获取真正的信息,但却会被第三方用户得知双方正在秘密通信的事实。这一事实将暴露通信双方的信息及通信目的,并增加被恶意攻击的可能性,后果不堪设想^[8]。此时,图像隐藏技术则能体现出其良好的特性。图像隐藏作为图像安全研究的重要内容,也一直备受研究者的关注。图像隐藏的一般模型可以描述如下:一个秘密图像可以嵌入到要发送的一个宿主图像中,使得包含秘密图像和宿主图像的隐藏图像在某些域中看起来像原始宿主图像的形式,以此实现隐藏秘密信息的目的。由此可知,图像隐藏技术能以传送公开图片的形式隐秘地传送秘密图像而不被第三方发觉,达到了隐瞒双方正在秘密通信的目的,显著地提高了秘密图像传输的安全性。近年来,将光信息的并行处理及高速特征运用到图像安全研究中已成为重要的研究课题^[9]。本文展示了凭借全光学手段实现光学图像隐藏的可行性^[10-11],对未来实现全光网络有重要参考意义^[12]。

在全光方案中,用于存储或传输全息图的巨大数据量一直是光学图像应用安全的主要限制因素。近几年,为了解决这个问题,已陆续提出多种全息压缩方案^[13-14]。但是,由于全息图散斑效应的影响,现有方案压缩效果并不理想^[15],且通常是以电学手段实现。由 Donoho 等^[16-18]提出的压缩感知理论,为光学领域的全息压缩技术提供了一种新的思路^[19-21]。压缩感知理论以远小于奈奎斯特采样率的条件采集可压缩信号的非自适应线性投影,然后将这些投影进行优化处理后,使用某种重构算法来恢复这些信号。但是,目前为止,使用完全光学方案实现的基于压缩感知的图像隐藏尚未被讨论。在过去数年里,已经提出了一些基于压缩感知的光学图像加密方法,例如,Liu 等^[22]提出在分数阶傅里叶变换域中使用基于混沌的双随机相位编码技术对经过压缩感知降维的图像测量值进行加密的算法;Zhou 等^[23]相继提出两种图像压缩加密的方案,一种是将二维压缩感知与非线性分数梅林变换相结合实现图像压缩加密,另一种是基于超混沌系统和二维压缩感知的高效图像压缩加密^[24];Chai 等^[25]提出了一种基于视觉的图像加密方案,将秘密图像嵌入到载体图像中形成在视觉上安全的图像。但上述的研究工作主要通过电学方式且多是对图像进行加密来实现图像安全。虽然这些方法通过使用压缩感知理论也可以大量减少数据量,但是不能应用于纯光学系统,如未来的全光网络系统。并且,由于电学方法的特性,上述方法大都是在图像信息采集到计算机后才对图片进行安全处理,并不能保证图像信息收集过程中的安全问题。

本文提出了一种在纯光学系统中实现的基于压缩感知和四步相移全息的光学图像隐藏方法。通过使用改进的马赫-曾德尔干涉仪,可以先将秘密图像嵌入到宿主图像中,在尽量不破坏宿主图像菲涅耳域的原始形式的情况下,隐藏秘密图像信息。此时,改进的马赫-曾德尔干涉仪中的参考光束不仅在全息记录过程中提供相移,同时还可以添加宿主图像以实现图像隐藏功能。然后,利用稀疏域中信号的稀疏性,将隐藏的图像压缩到更小的信号中。在接收终端,通过优化处理,从少量数据中实现隐藏图像的重构,并使用指定的算法执行原始秘密图像的恢复。该方法可以在纯光学系统中执行压缩光学图像隐藏,因此有效且适用于未来全光网络中的光学图像安全传输。同时,该方法利用信号的稀疏性可以从非常小的样本重建完整的信号,因此可突破三维(3D)图像、全息图超大数据量的限制,有望应用于未来 3D 图像的安全传输处理中。

2 基本原理

压缩光学图像隐藏系统如图 1 所示。激光束经过扩束镜和分束镜后被分为物光光束和参考光束。其中,物光光束照射显示在空间光调制器(SLM)上的秘密图像 O_s ;另一条光路中,参考光束首先照射压电换能器(PZT)来改变相移,然后照射宿主图像 O_h 。携带秘密图像信息的物光光束和携带宿主图像信息的参考光束重叠后发生菲涅耳衍射,并在数字微镜阵列(DMD)上形成干涉条纹。为获得干涉全息图 $I_H(\xi, \eta)$ 压缩采样之后的数据,可计算 $I_H(\xi, \eta)$ 和加载在 DMD 平面上的矩阵随机线性测量值,然后通过单点探测器采集数据,最后经由传统信道传输到计算机端。在计算机端,通过使用 LabVIEW 软件设计的

压缩采样控制系统,实现压缩采样数据的收集、初步筛选和采样时间控制。经由单点探测器和 LabVIEW 软件采集数据,通过特定算法重构出隐藏图像。并且可通过相应的光学系统进行逆菲涅耳变换,从隐藏图像中恢复出原始的秘密图像。

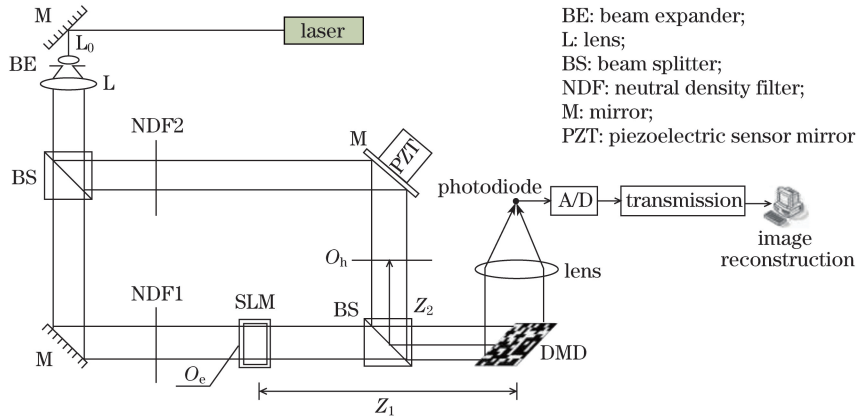


图 1 压缩光学图像隐藏系统

Fig. 1 Compressed optical image hiding system

假设物光照射在秘密图像的透射率为 $O(x_0, y_0)$, 则 $O(x_0, y_0)$ 在 DMD 平面上的复振幅分布可以表示为

$$\psi_0(\xi, \eta) = \text{Frt}[O(x_0, y_0)] = A(\xi, \eta) \exp[i\phi(\xi, \eta)]. \quad (1)$$

式中 Frt 表示 $O(x_0, y_0)$ 的非涅耳变换, $\phi(\xi, \eta)$ 和 $A(\xi, \eta)$ 代表秘密图像的相位和振幅, 宿主图像衍射的复振幅分布可表示为

$$\psi_h(\xi, \eta; \phi_R) = A_h(\xi, \eta) \exp[i\phi_h(\xi, \eta)] \exp(i\phi_R), \quad \phi_R = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, \quad (2)$$

式中 ϕ_R 代表步进相移。因此, DMD 平面上光强值可表示为

$$I_H(\xi, \eta; \phi_R) = |\psi_0(\xi, \eta) + \psi_h(\xi, \eta; \phi_R)|^2 = A^2(\xi, \eta) + A_h^2(\xi, \eta) + 2A(\xi, \eta)A_h(\xi, \eta) \cos[\phi_h(\xi, \eta) + \phi_R - \phi(\xi, \eta)], \quad \phi_R = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}. \quad (3)$$

DMD 由数百万个可转动的微镜组成。图像的每个像素由不同的微镜对应生成。每个微镜在水平方向偏转角为 $\pm 12^\circ$, 且可通过随机数字发生器控制。微镜 $+12^\circ$ 方向的偏转是为了保证对应像素的光信息可被单点探测器采集; 而 -12° 的偏转则是为了对应像素光信息不被单点探测器采集。秘密图像隐藏后形成的干涉全息图 $I_H(\xi, \eta)$ 的光信息投射到 DMD 平面上并被其采集。然后, 可通过计算 DMD 平面上的测量矩阵 Φ_m 与干涉全息图 $I_H(\xi, \eta)$ 的随机线性测量值得到干涉全息图的压缩采样数据。最后, 这个数据的光信息可被高灵敏度的单点探测器采集。

单点探测器输出的电压值可表示为

$$Y(m) = \{y_{1m}, y_{2m}, y_{3m}, y_{4m}\} = \Phi_m [I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}, I_{H4}], \quad (4)$$

式中 Φ_m 表示 DMD 平面上的 m 维伪随机测量矩阵, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。当重复进行 M 次测量时, 可以得到测量值 Y , 表示为

$$Y = [y_1, y_2, y_3, y_4] = \Psi [I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}, I_{H4}], \quad (5)$$

式中 $(I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}, I_{H4}) = \begin{bmatrix} I_{H11} & I_{H21} & I_{H31} & I_{H41} \\ I_{H12} & I_{H22} & I_{H32} & I_{H42} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{H1N} & I_{H2N} & I_{H3N} & I_{H4N} \end{bmatrix}$, $\Psi \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 是 DMD 产生的测量矩阵, 且 M, N 分别为

测量矩阵的行和列, $Y \in \mathbf{R}^{M \times 4}$ 是测量值, y 表示当每幅全息图 I_H 投影到 DMD 上进行压缩采样处理时, 由单点探测器记录的测量数据。 $y_k \in \mathbf{R}^{M \times 1}$, $I_{Hk} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$, $k = 1, 2, 3, 4$ 。

利用光电二极管将采集到的光信号转换为电信号,并使用传统信道将其传输到图像重构计算机,使用 LabVIEW 软件对采集过程进行控制。

首先,采用两步迭代收缩算法^[26]来重构压缩采样的干涉全息图,通过解决下面的最优问题来重建强度 \hat{I}_{Hk} :

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

式中 $\|y_k - \hat{I}_{Hk}\|_2^2$ 是 $y_k - \hat{I}_{Hk}$ 的 l_2 范数的平方, μ 是常量。加号前的部分是一个最小二乘项,它表示当 \hat{I}_{Hk} 与 y_k 一致时,可得到 \hat{I}_{Hk} 的最小值。对于图像信号,大多数图像的梯度是稀疏的, Rudin 等^[27]提出了一种非线性全变差(TV)算法,尝试以有效的方式对图像降噪;同时,可以强化稀疏约束,并在压缩感知理论下重构图像。Candès 等^[28]提出了利用最小 TV 约束的原理使图像的梯度最小化。因此,(6)式中加号后的部分即为信号的全变差,可表示为

$$\text{TV}(\hat{I}_{Hk}) = \sum_{i,j} \sqrt{(\hat{I}_{Hk(i+1),j} - \hat{I}_{Hki,j})^2 + (\hat{I}_{Hki,(j+1)} - \hat{I}_{Hki,j})^2} + \eta^2, \quad (7)$$

式中下标索引 i, j 遍历 \hat{I}_{Hk} 成对的相邻像素点,使得 $\text{TV}(\hat{I}_{Hk})$ 只是离散梯度 \hat{I}_{Hk} 的 l_1 范数, η 是一个较小的正参数。根据此算法,可重构出 4 幅干涉全息图 $\hat{I}_{H1}, \hat{I}_{H2}, \hat{I}_{H3}, \hat{I}_{H4}$ 。

然后,根据马赫-曾德尔四步相移全息术理论推导,利用重构出的 4 幅干涉全息图和宿主图像的相位信息及图 1 所示的光学系统的参数,可完成对秘密图像的恢复。首先,计算隐藏图像的相位 $\phi(\xi, \eta)$ 和振幅 $A(\xi, \eta)$,可分别表示为

$$\phi(\xi, \eta) = \tan^{-1} \frac{\hat{I}_{H2} - \hat{I}_{H4}}{\hat{I}_{H1} - \hat{I}_{H3}} + \phi_h(\xi, \eta), \quad (8)$$

$$A(\xi, \eta) = \frac{[(\hat{I}_{H1} - \hat{I}_{H3})^2 + (\hat{I}_{H2} - \hat{I}_{H4})^2]^{1/2}}{4A_h}, \quad (9)$$

式中宿主图像的衍射分布 ϕ_h 和 A_h 可通过马赫-曾德尔四步相移全息术预先知晓。然后,通过菲涅耳逆变换,可恢复出原始的秘密图像:

$$O'(x_0, y_0) = \text{IFrt}[\psi_0(\xi, \eta)] = \text{IFrt}[A(\xi, \eta)] \exp[i\phi(\xi, \eta)], \quad (10)$$

式中 IFrt 代表菲涅耳逆变换。

3 实验结果

为验证该方案的可行性和有效性,首先进行仿真计算。所用计算机的中央处理器(CPU)为 Intel(R) Core(TM) i7,运行内存为 16 GB,仿真软件为 MATLAB R2014b。设置激光波长为 $\lambda = 632.8$ nm,设置物光光束和参考光束的光振幅比为 0.1:1,秘密图像和宿主图像的记录距离分别为 0.2 m 和 0.3 m。其中,图 2(a)为宿主图像 lake;图 2(b)为秘密图像 woman2,图像尺寸均为 256 pixel \times 256 pixel;图 2(c)为宿主图像全息图;图 2(d)为隐藏图像的全息图;图 2(e)为不经过压缩采样的干涉全息图恢复出来的秘密图像;图 2(f)为经过压缩采样且采样率为 22% 的干涉全息图恢复出来的秘密图像。仿真结果表明,秘密图像的全息图有效地隐藏在宿主图像的全息图中,且不破坏宿主图像菲涅耳域的原始形式。在使用小数据量的情况下,该方法可以快速从隐藏图像中高质量地恢复出秘密图像,保证了图像传输过程中的安全性与高效性。

为了进一步验证该方法的现实可行性,进行了相关实验研究。在实验中,采用 HOLOEYE LC 2002 型 SLM,其水平方向、垂直方向的分辨率为 800×600 ,像素间距为 $32 \mu\text{m}$,并选用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光。设置物光光束和参考光束之间的光振幅比为 0.1:1,秘密图像和宿主图像的记录距离分别为 0.768 m 和 1.004 m。分别对两组图像进行了验证,其中宿主图像和秘密图像都经过 Microsoft Office 2003 软件编辑。

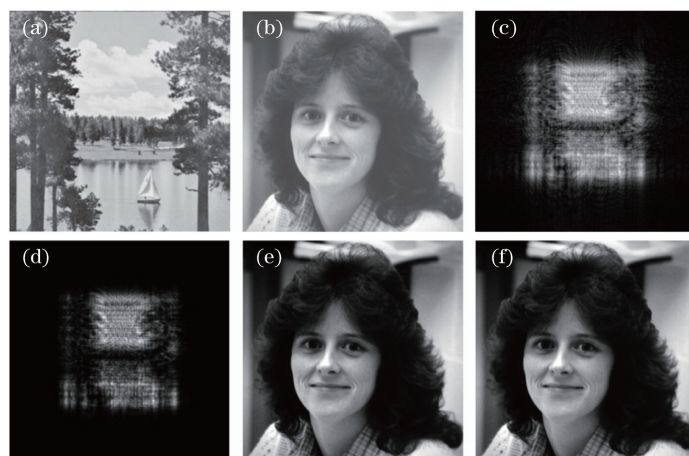


图 2 仿真结果。(a)宿主图像;(b)秘密图像;(c)宿主图像的全息图;(d)隐藏图像的干涉全息图;
(e)不经过压缩感知恢复的原始秘密图像;(f)采用 22%测量值重构的秘密图像

Fig. 2 Simulation results. (a) Host image; (b) secret image; (c) hologram of the host image;
(d) interference hologram of hidden image; (e) recovered original secret image without compressive sensing;
(f) reconstructed secret image with 22% measurements

第一组中,宿主图像 C 的大小为 $0.4 \text{ cm} \times 0.3 \text{ cm}$,秘密图像 F 的大小为 $0.896 \text{ cm} \times 0.448 \text{ cm}$ 。实验中,图像大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,采用 22% 的测量值,然后通过这些测量值以及已知的光学参数,从压缩的隐藏图像中重建原始秘密图像。使用改进的马赫-曾德尔干涉仪实现的压缩光学图像隐藏的初步实验结果如图 3 所示。图 3(a)和图 3(b)分别为第一组宿主图像和秘密图像;图 3(c)为宿主图像的全息图;图 3(d)为第一组的隐藏图像在 DMD 平面中的干涉全息图;图 3(e)为第一组图像没有进行压缩采样步骤恢复的原始秘密图像;图 3(f)为采用本文方法对图像大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,采用 22% 的测量值重建的第一组图像的原始秘密图像,对比图 3(e)和图 3(f)可以得出,采用 22% 和 100% 的测量值重建的秘密图像几乎相同。在此基础上,继续验证第二组图,在宿主图像不变的情况下,更换秘密图像为较复杂的 sunshape 图,其尺寸大小为 $0.5568 \text{ cm} \times 0.5952 \text{ cm}$,实验结果如图 4 所示。实验结果验证了该方案的现实普遍可行性,这种压缩光学图像隐藏方法通过在菲涅耳域中使用全光学方案,能在小数据量的情况下恢复出较高质量的秘密图像,从而进一步验证了该方案的安全性与高效性。

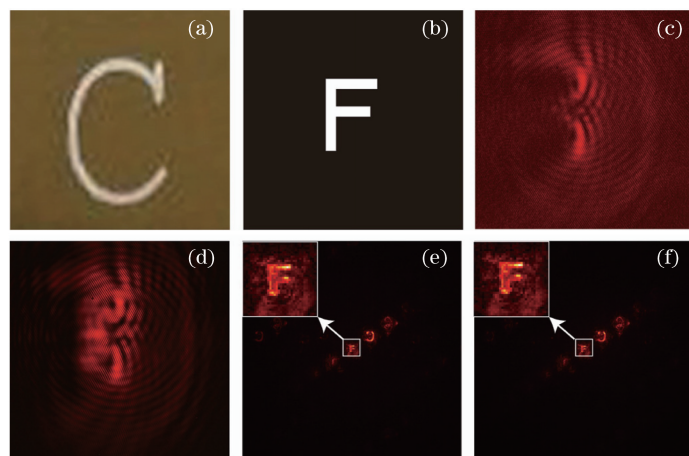


图 3 第一组实验结果。(a)宿主图像;(b)秘密图像;(c)宿主图像的全息图;(d)隐藏图像在 DMD 平面上的干涉全息图;
(e)不经过压缩感知恢复的原始秘密图像;(f)采用 22%测量值重构的秘密图像

Fig. 3 Experimental results of first group. (a) Host image; (b) secret image; (c) hologram of the host image;
(d) interference hologram of the hidden image in the DMD plane; (e) recovered original secret image
without compressive sensing; (f) reconstructed image with 22% measurements

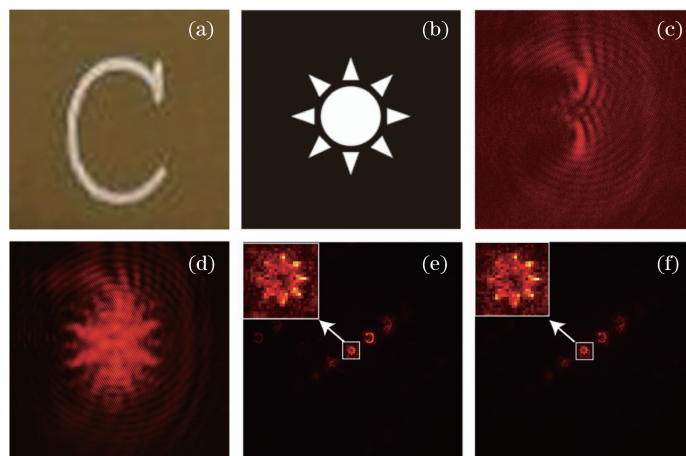


图 4 第二组实验结果。(a)宿主图像;(b)秘密图像;(c)宿主图像的全息图;(d)隐藏图像在 DMD 平面上的干涉全息图像;
(e)不经过压缩感知恢复的原始秘密图像;(f)采用 22%测量值重构的秘密图像

Fig. 4 Experimental results of second group. (a) Host image; (b) secret image; (c) hologram of the host image;
(d) interference hologram of the hidden image in the DMD plane; (e) recovered original secret image
without compressive sensing; (f) reconstructed image with 22% measurements

4 分析与讨论

峰值信噪比(PSNR)和平均结构相似性(MSSIM)是用于表征重建图像保真度的指标。通过计算,两组原始秘密图像和重建秘密图像之间的 PSNR 和 MSSIM 随着采样率变化的关系分别如图 5(a)和图 5(b)所示。可见,原始秘密图像和重建秘密图像之间的 PSNR 值大于 35 dB 且 MSSIM 值大于 0.85。随着采样率增加,PSNR 和 MSSIM 也明显增加。当采样率达到 20%时,PSNR 值接近或超过 40 dB, MSSIM 值超过 0.95。这表明,本方案可行且有效,能在大大减少采集数据量的前提下,以较高信噪比及较高的平均结构相似性重建出被隐藏的秘密图像。在不同重构率下,图像重建过程所消耗的时间对比如表 1 所示。

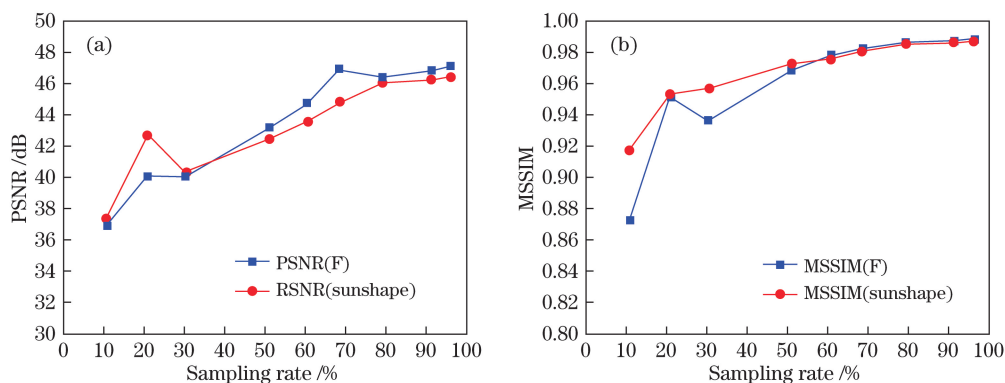


图 5 不同采样率下,图像重建结果分析图。(a) PSNR 曲线图;(b) MSSIM 曲线图

Fig. 5 Analysis of image reconstruction results at different sampling rates. (a) PSNR curves; (b) MSSIM curves

5 结 论

提出了一种基于压缩感知并使用全光学手段实现的新型光学图像隐藏技术,可以在纯光学系统中执行压缩光学图像隐藏,并且在压缩光学图像隐藏实验中,使用 DMD 实现高速测量,提高了系统的实时性能。本文方法可以在全光域实现对原始秘密图像的重建,并且只需常规奈奎斯特采样下 22%的测量数据,减少了采样时间。因此,相比传统的光学图像隐藏系统,本文方法在保证图像安全传输的前提下,大大减少了实验所需数据量,提高了系统的效率。此项技术可以用于突破 3D 图像、全息图大数据量的局限性,并且可广泛应用于 3D 图像隐藏、视频安全传输以及未来全光传输系统,如实时视频安全传输和裸眼 3D 电视等。

表 1 不同采样率下两幅图像的重建时间
Table 1 Reconstruction time of two images at different sampling rates

Sampling rate /%	Time of image F /s	Time of image sunshape /s
10.8	1.1543	1.1525
22.8	1.1458	1.1521
30.2	1.1574	1.1579
51.3	1.1508	1.1556
60.5	1.1554	1.1584
68.3	1.3084	1.1529
80.0	1.1554	1.1584
91.1	1.1590	1.1496
96.1	1.1639	1.1622

本文提出的压缩光学图像隐藏方案是在经典的基于相移数字全息的光学通用系统上实现的。在此基础上,为了减少实验过程中的数据量,实现全息图的压缩处理,增加了压缩成像部分。该部分采用基于 DMD 的压缩成像方案,由于当下压缩成像技术比较成熟且 DMD 器件成本日渐降低,因此其物理可实现性以及物理可重复性较高。由于 DMD 具有高速同步测量特性,所以该方案也可用于动态压缩图像隐藏及高速测量等。但由于整体系统是通过 DMD 来实现的相移全息系统与压缩成像系统的级联,所以如何降低由此产生的噪声是整体系统实现上面对的困难之一。

本方案在实验结果上仍有改进的空间。为了进一步改善实验结果并提高效率,未来的工作将分两方面展开:1)考虑结合压缩感知和两步相移全息以及单步相移全息来实现图像隐藏工作;2)着重研究在压缩重构的过程中,如何更好利用全息图的稀疏特性来对图像进行压缩,从而进一步减少数据量的采集。

参 考 文 献

- [1] Yin Zhaoxia. Privacy protection oriented image steganography[D]. Hefei: Anhui University, 2014.
殷赵霞. 面向隐私保护的数字图像隐写方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
- [2] Han Tao, Fei Jinlong, Liu Shengli, *et al.* Large-payload image-hiding method based on block matching and syndrome Trellis codes[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(2): 271-279.
韩涛, 费金龙, 刘胜利, 等. 基于块匹配和校验格编码的大嵌入率图像隐藏方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(2): 271-279.
- [3] Petitcolas F A P, Anderson R J, Kuhn M G. Information hiding-a survey[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1062-1078.
- [4] Tanha M, Kheradmand R, Ahmadi-Kandjani S. Gray-scale and color optical encryption based on computational ghost imaging[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(10): 101108.
- [5] Chen G R, Mao Y B, Chui C K. A symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 21(3): 749-761.
- [6] Hou Junfeng, Huang Sujuan, Situ Guohai. Nonlinear optical image encryption[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0807001.
侯俊峰, 黄素娟, 司徒国海. 非线性光学图像加密[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0807001.
- [7] Xie Qingkun, Jiang Yanru, Zhang Wenfei, *et al.* Information encryption technologe based on digital watermarking and iteration algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0607001.
解青坤, 姜艳茹, 张文飞, 等. 基于数字水印和迭代算法的信息加密技术[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0607001.
- [8] Wang Kang. Research on digital image steganography[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
王康. 数字图像隐写技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [9] 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.
- [10] Li J, Li J S, Pan Y Y, *et al.* Optical image hiding with a modified Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 55(7): 258-261.

- [11] Li J, Li J S, Shen L N, *et al.* Optical image encryption and hiding based on a modified Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4849-4860.
- [12] Brackett C A, Acampora A S, Sweitzer J, *et al.* A scalable multiwavelength multihop optical network: a proposal for research on all-optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(56): 736-753.
- [13] Naughton T J, Frauel Y, Javidi B, *et al.* Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition[J]. Applied Optics, 2002, 41(20): 4124-4132.
- [14] Shortt A E, Naughton T J, Javidi B. Compression of digital holograms of three-dimensional objects using wavelets[J]. Optics Express, 2006, 14(7): 2625-2630.
- [15] Patten R E, Hennelly B M, Kelly D P, *et al.* Speckle photography: mixed domain fractional Fourier motion detection[J]. Optics Letters, 2006, 31(1): 32-34.
- [16] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [17] Magana-Loaiza O S, Howland G A, Malik M, *et al.* Compressive object tracking using entangled photons[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(23): 231104.
- [18] Sun B, Edgar M P, Bowman R, *et al.* 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. Science, 2013, 340(6134): 844-847.
- [19] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, *et al.* Compressive holography with a single-pixel detector[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2524-2527.
- [20] Li J, Wang Y P, Li R, *et al.* Coherent single-detector 3D imaging system[C]. ISPDI 2013—Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, 2013, 8913: 891303.
- [21] Li J, Li Y Q, Wang Y, *et al.* Two-step holographic imaging method based on single-pixel compressive imaging[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2014, 18(2): 146-150.
- [22] Liu X B, Mei W B, Du H Q. Optical image encryption based on compressive sensing and chaos in the fractional Fourier domain[J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(19): 1570-1577.
- [23] Zhou N R, Li H L, 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.
- [24] Zhou N R, Pan S M, 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.
- [25] Chai X L, Gan Z H, Chen Y R, *et al.* A visually secure image encryption scheme based on compressive sensing[J]. Signal Processing, 2017, 134: 35-51.
- [26] José M, Bioucas-Dias, Figueiredo M A T. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J], 2007, 16(12): 2992-3004.
- [27] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1/2/3/4): 259-268.
- [28] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 52(2): 489-509.