

基于连续小波变换的抗干扰计算鬼成像

王爽, 王晓茜, 苟立丹, 姚治海, 高超**, 冯玉玲*

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 计算鬼成像由于具有分辨率高和抗干扰能力强等特点, 近年来被广泛研究。区别于传统成像方案, 由于成像机制, 计算鬼成像对物体成像时需要进行大量的测量, 因此提高它的成像效率一直是一个重要的研究内容。在此背景下, 由于可以较好地对信号进行去相关, 进而对信号进行大幅压缩, 小波变换受到了广泛的关注。近年来, 不少学者将 Haar 小波引入计算鬼成像系统中, 成像效率得到了提高。然而, 小波函数的种类有很多, 性质各异, 关于其他小波函数在计算鬼成像系统中的应用鲜有报道。大部分小波函数只能进行连续小波变换, 直接应用于计算鬼成像系统中会面临许多问题, 针对这个情况, 提出了准连续小波变换架构, 在实验上实现了基于 Mexihat 和 Gauss 小波的计算鬼成像。实验结果表明, 这两种连续小波方案既能够进行正常成像, 同时相比于 Haar 小波, 它们也表现出了更强劲的抗干扰能力, 更加适用于实际应用环境。

关键词 计算鬼成像; Gauss 小波; Mexihat 小波; 连续小波变换; 成像系统中的噪声

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1811002

Strong Robust Computational Ghost Imaging Based on Continuous Wavelet Transform

Wang Shuang, Wang Xiaoqian, Gou Lidan, Yao Zhihai, Gao Chao**, Feng Yuling*

College of Science, Changchun University Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Computational ghost imaging (CGI) has been widely studied owing to its high resolution and robustness. In contrast with traditional imaging schemes, CGI requires large amount of measurements to be taken for reconstructing a single image; thus, the efficiency of CGI needs to be improved. In this context, wavelet transform has attracted much attention because it can better decorrelate and then significantly compress a signal. By introducing Haar wavelet transform into the CGI scheme, the imaging speed has been significantly improved. However, because of the presence of various types of wavelets with different features, the application of other wavelets in the CGI scheme is scarcely reported. Because many wavelets are unorthogonal, they can only perform continuous wavelet transform, which may bring problems when applying them to the CGI scheme. Thus, a semicontinuous wavelet transform scheme was proposed. A CGI based on Mexihat and Gauss wavelets (both in 1D and 2D) were experimentally realized. The experimental results show that the two continuous wavelet schemes can perform normal imaging and show stronger antiinterference ability than Haar wavelet, which are more suitable for practical applications.

Key words computational ghost imaging; Gauss wavelet; Mexihat wavelet; continuous wavelet transform; noise in the imaging system

1 引言

鬼成像(又称关联成像)是一种新型的成像方式, 主要利用二阶关联函数对所获得的光强进行计算, 从而达到恢复待测物体空间信息的目的。2008年 Shapiro^[1]提出计算鬼成像方案, 次年 Bromberg 等^[2]验证了其可行性。相对于传统的双臂鬼成像, 计算鬼成像的光路简单, 并且能够人为地控制散斑图样, 可以设

计出具有不同特性的散斑图样来提高成像质量, 因此计算鬼成像相比传统的鬼成像具有更高的应用价值^[3-11]。随着对计算鬼成像的深入研究, 人们发现成像质量和成像速度严重制约了该技术的进一步发展。近年来, 人们通过设计重构算法和应用不同的照明图样, 成像质量和成像效率已经有所改进^[12-15], 但仍有提升空间。而成像速度提高的关键是在采样、重构过程中去除不必要的信息。有些人将小波变换引入到鬼成像中, 以

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-07-13; 录用日期: 2021-07-22

基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202101ZYTS030)

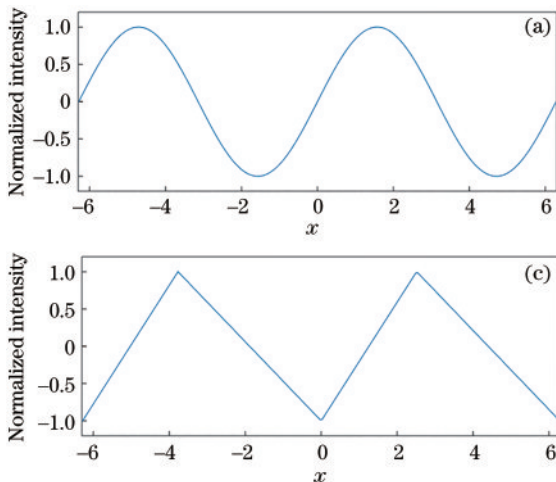
通信作者: *supergoddy@qq.com; **921663595@qq.com

提高成像速度^[16-19]。小波变换来自傅里叶变换,但优于傅里叶变换,可以通过对小波基函数进行伸缩和平移,对信号的局部特征进行分析。近年来,人们已经利用离散 Haar 小波变换大幅地提升了计算鬼成像的成像效率^[20]。然而,关于其他小波函数在计算鬼成像系统中的应用鲜见报道。受益于种类繁多的小波函数所带来的不同优异性质,可以进一步地增强计算鬼成像的表现。值得注意的是,大多数小波函数都能实现连续小波变换,而能够实现离散小波变换的小波函数却屈指可数,显然连续小波变换对小波函数的限制更小,所以对基于连续小波变换的计算鬼成像的研究是有必要的。

连续小波变换使用的是尺度、平移因子和空间坐标都连续变化的小波函数,因此理论上小波函数系的规模是趋近于无穷大的,需要经合适的离散化处理后才能适用于对照明图样的个数和空间分布都有离散性要求的计算鬼成像系统。基于此,本文提出一种准连续变换方式,它具有连续小波变换和离散小波变换的优势,同时也能使成像所需的测量次数降低为有限次,使得连续小波变换在计算鬼成像中的应用成为可能。通过数值模拟和实验验证了所提成像方案能够对物体进行正常成像。更为重要的是,本文以两种典型的连续 Gauss 小波和 Mexihat 小波为例,讨论了外界干扰对不同方案成像结果的影响。结果表明,所提成像方案不仅保持了小波变换在成像效率上的优势,同时存在外界噪声污染和探测器的光强-电压响应偏离线性响应情况下,所提成像方案相比 Haar 小波方案具有明显优势,有利于计算鬼成像在实际过程中的应用。

2 理论分析与数值模拟

为了方便分析,先考虑一维的情况,对信号 $f(x)$ 的连续小波变换记作 $WT_f(a, b)$:



$$WT_f(a, b) = \int f(x) \psi_{a,b}(x) dx, \quad (1)$$

式中:参数 a 为尺度因子,控制小波函数伸缩;参数 b 为平移因子,控制小波函数的平移; $\psi_{a,b}(x)$ 为连续小波函数。

在连续小波变换中,参数 a 和 b 是连续变量,对于每个 a, b 组合都会产生一个照明图样,因此所需要的测量次数是无穷多的。计算鬼成像的测量次数只能是有限次,导致无法在计算鬼成像系统中进行成像,因此需要对这些参数进行一定的离散化处理。首先从离散小波变换出发,对小波函数进行二进伸缩平移,构造小波函数 $\psi_{a,b}(x)$:

$$\psi_{a,b}(x) = \sqrt{|a|} \psi[a(x-b)]. \quad (2)$$

对于离散小波变换,尺度因子 a 是二进伸缩平移的,对于一个定义区间 $[-x_{\max}, +x_{\max}]$ 的母小波,在尺度因子 a 下进行二进伸缩和平移,则平移因子 b 的取值范围为

$$b = \frac{rm}{a}, \quad (3)$$

式中: a 为 2 的整数次幂; r 为母小波定义区间长度, $r = x_{\max} - (-x_{\max}) = 2x_{\max}$; $m = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm a/2$ 。特别指出 $a = 1, b = 0$ 时,表示伸缩 1 倍时不平移。

由于连续小波通常是非正交的,因此直接利用离散小波变换对信号进行变换时会出现问题。以一维 Mexihat 小波为例,母小波定义为

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{\pi}}} (1-x^2) e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (4)$$

使用定义在 $[-5, +5]$ 区间的一维 Mexihat 小波对一维正弦信号和三角波信号进行信号变换和重构,结果如图 1 所示。

如图 1 所示,在使用 Mexihat 小波图样进行信号重构时,重构结果出现异常,无法准确获取物体信息。这是由于小波函数间存在一些空隙,对物体进行测量时

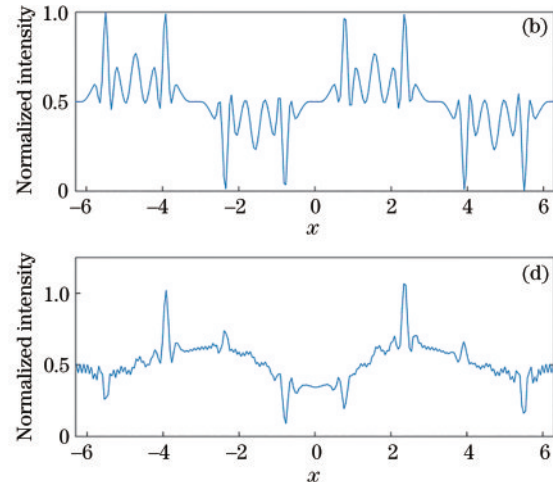


图 1 一维 Mexihat 小波对一维信号的重构结果。(a)(c)一维正弦波信号和一维三角波信号;(b)(d)一维 Mexihat 小波对图 1(a)和图 1(c)重构出的结果

Fig. 1 Results of 1D signal reconstructed by 1D Mexihat wavelet. (a) (c) 1D sine wave signal and 1D triangle wave signal; (b) (d) results of reconstructing Fig. 1 (a) and Fig. 1 (c) using 1D Mexihat wavelet

没有对每个像素点进行均等测量。图 2 给出了小波函数的叠加 $R_{\Sigma} = \sum_a \sum_b \psi_{a,b}(x)$, 验证了上述结论。

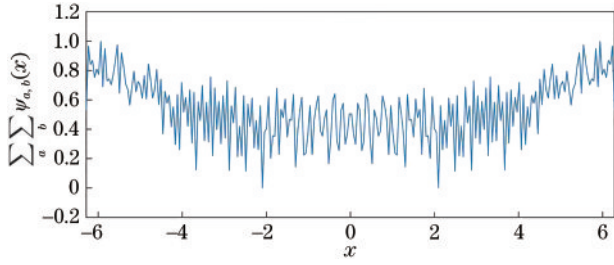


图 2 一维 Mexihat 小波函数叠加的结果

Fig. 2 Result of 1D Mexihat wavelet function superposition

为了解决这一问题,通过引入与原小波系提前或滞后一定相位的小波系,在一定程度上填补小波函数之间的空隙,从而使每个像素点变得更加均匀,从而理论上能获得更好的成像效果。相对于小波函数系 $\psi_{a,b}(x)$, 定义对应小波函数系的相移为

$$\psi_{a,b}^{(\Delta)}(x) = \psi_{a,b}(x - D_{n,i}), \quad (5)$$

定义相移量 $D_{n,i}$ 为

$$D_{n,i} = \frac{r}{a} \Delta, \quad (6)$$

式中:参量 Δ 取 $\pm \frac{1}{n}$; n 为小波函数系的个数,取整数;

i 为第 i 次增补相移; $\frac{r}{a}$ 为 a 缩放下小波函数的周期。

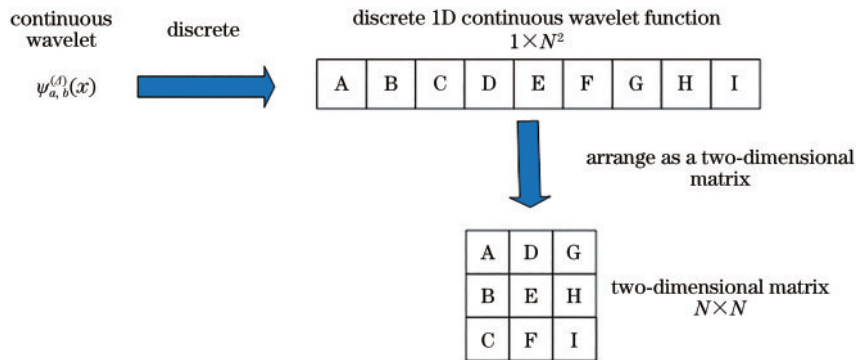


图 4 基于一维连续小波生成照明图样的示意图

Fig. 4 Schematic of illumination pattern generation based on 1D continuous wavelet

使用一维连续小波照明图样的成像方案所需要的测量次数为

$$K = (N^2 - 1)n. \quad (7)$$

利用上述照明图样对待测物体进行照射,可得到一组桶探测器 $B^{(j)}$:

$$B^{(j)} = \sum_x R^{(j)}(x)T(x), \quad (8)$$

式中: $T(x)$ 是待测物体的传递函数; $R^{(j)}$ 是第 j 张照明图样; $B^{(j)}$ 对应第 j 次测量时桶探测器收集到的光强值。

计算二阶关联函数,以恢复待测物体的像:

为了使相移后的小波函数系与原小波函数系组成的新的小波函数系能对信号实施较为均匀的测量,使每次的相移量为周期的 $\frac{1}{n}$, 向左侧和右侧进行共计 $(n - 1)$ 步相移,直至填满一个周期,如图 3 所示。

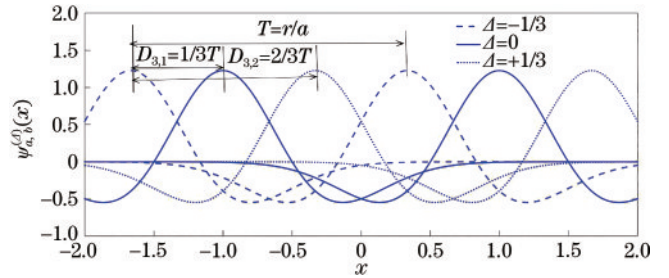


图 3 区间长度 $r=4$ 上的一维 Mexihat 小波函数在伸缩尺度 $a=2$ 时进行 2 次增补相移 ($n=3$) 生成的小波函数系

Fig. 3 Wavelet function system generated using 1D Mexihat wavelet function on interval length $r=4$ with two additive phase shifts ($n=3$) at the zoom scale $a=2$

当用一维小波函数去构造照明图样时,首先要对其进行像素化,设待测物的像素点个数为 N^2 (N 为整数),先生成原小波函数系,再通过增补相移形成一个新的小波函数系,然后将每个小波函数在 x 轴上细分成 N^2 等份,生成 $(1 \times N^2)$ 的行向量 $\psi_{a,b}^{(\Delta)}(x)$ 。由于计算鬼成像是二维图像信息进行获取的,所以需要将行向量形式的小波函数排列成二维矩阵,生成二维照明图样。构造的照明图样示意图如图 4 所示。

$$G(x) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K B^{(j)} R^{(j)}(x). \quad (9)$$

通过数值模拟,计算基于准连续小波变换成像方案的成像结果,如图 5 所示。显然,基于准连续小波变换的成像方案可以有效减少重构图像中的畸变,达到与 Haar 小波成像方案接近的重构结果。

通过引入与原小波系提前或滞后一定相位的小波系,可以填补小波函数间的空隙,避免小波函数空隙处的像素点所得到的光照强度较低。基于相同的思想,让小波函数间邻近的地方尽可能少地出现低绝对值元素,也能达到相同效果,如图 6 所示。通过仿真结果表明,通

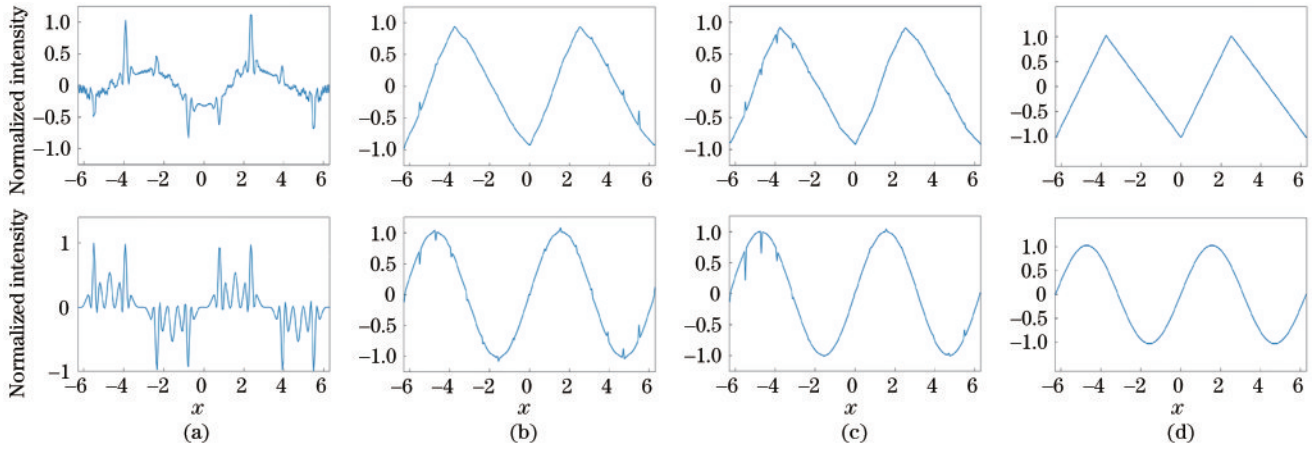


图 5 不同一维小波成像方案对一维信号的重构结果。(a)未基于准连续小波变换的一维 Mexihat 小波成像方案的重构结果；(b)基于准连续小波变换的一维 Gauss 小波成像方案的重构结果；(c)基于准连续小波变换的一维 Mexihat 小波成像方案的重构结果；(d)基于准连续小波变换的一维 Haar 小波成像方案的重构结果

Fig. 5 Reconstruction results of different 1D wavelet imaging schemes for 1D signals. (a) Reconstruction results of 1D Mexihat wavelet imaging scheme without semi-continuous wavelet transform; (b) reconstruction results of 1D Gauss wavelet imaging scheme based on semi-continuous wavelet transform; (c) reconstruction results of 1D Mexihat wavelet imaging scheme based on semi-continuous wavelet transform; (d) reconstruction results of 1D Haar wavelet imaging scheme based on semi-continuous wavelet transform

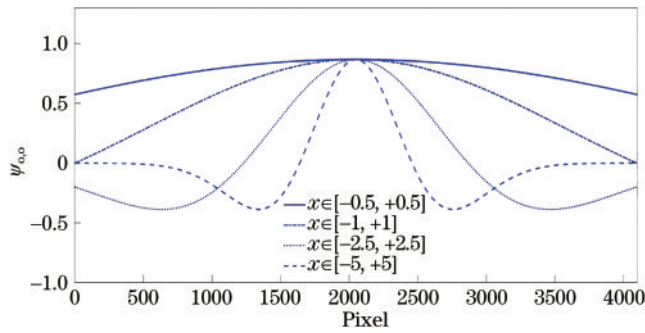


图 6 在不同区间长度 n 上的一维 Mexihat 小波函数

Fig. 6 1D Mexihat wavelet functions on different interval lengths n

过缩短小波函数的定义区间,可以有效减小重构图中的格栅状畸变,如图 7 所示。因此,小波函数在增补相移的基础上选取合适的定义区间会使重构效果更好。

通过数值模拟,比较一维 Gauss 小波图样、一维 Mexihat 小波图样、一维 Haar 小波图样和随机二值散斑图样成像方案的成像结果,结果如图 8 所示。可以发现,相比于随机二值散斑成像方案,基于一维 Gauss 小波和一维 Mexihat 小波的成像方案可以正常成像,并且可以达到与一维 Haar 小波成像方案接近的成像结果。

用一维小波函数构造照明图样时,是将行向量形式的小波函数列向顺次排列生成的,这导致一维小波照明图样中出现垂直方向的小条,不利于对物体进行二维特征的描述,因此将一维小波函数扩展至二维,使用二维连续小波函数构造照明图样。首先需要构造 $N \times N$ 二维小波基函数,选取 x 和 y 两个正交方向,分别在原小波函数基础上增补相移,形成新的小波函数系。由于 Gauss 小波、Mexihat 小波不存在尺度函数,本文使用 Gauss 函数替代尺度函数,函数表达形式为

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (10)$$

增补相移后的尺度函数形式为

$$\psi_{a,b}^{(\Delta)}(x) = \psi_{a,b}(x - \frac{2x_{\max}}{a} \Delta). \quad (11)$$

通过两两组合“尺度函数”和“小波函数”,获得平均 (average)、横向 (horizontal)、纵向 (vertical)、斜向 (diagonal) 四个系列小波函数 $\hat{\psi}_{k,q}^{a,A}$ 、 $\hat{\psi}_{k,q}^{a,H}$ 、 $\hat{\psi}_{k,q}^{a,V}$ 、 $\hat{\psi}_{k,q}^{a,D}$, 具体形式分别为



图 7 在不同定义区间长度 r 下,基于一维 Mexihat 小波的鬼成像方案的仿真成像结果 ($n=3$)。 (a)~(f) 一维 Mexihat 小波在区间长度 $r=0.2, 1, 2, 4, 6, 10$ 的重构结果

Fig. 7 Simulation imaging results of the ghost imaging scheme based on 1D Mexihat wavelet ($n=3$) under different defined interval lengths r . (a)~(f) Reconstructed results of 1D Mexihat wavelets under interval lengths $r=0.2, 1, 2, 4, 6, 10$

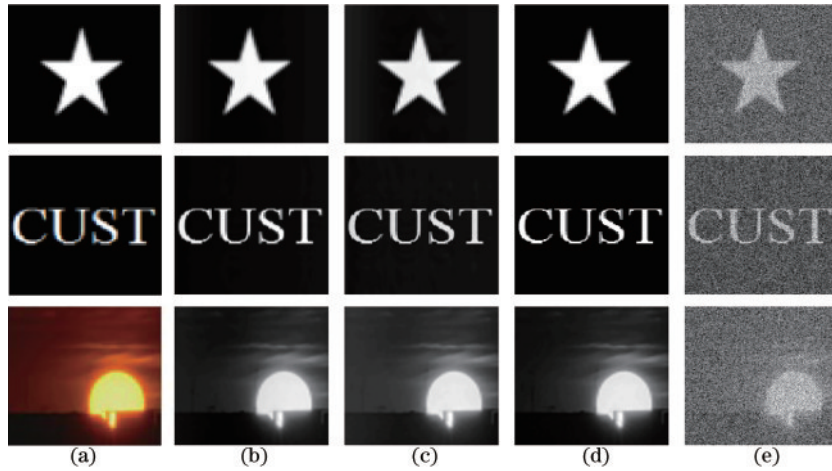


图 8 一维情况下,四种照明图样鬼成像方案的仿真成像结果。(a)原图(128×128 像素大小);(b)基于一维 Gauss 小波的成像方案的成像结果($r=3.5, n=3$);(c)基于一维 Mexihat 小波的成像方案的成像结果($r=2.5, n=3$);(d)基于一维 Haar 小波的成像方案的成像结果;(e)基于随机二值散斑的成像方案的成像结果

Fig. 8 Simulated imaging results of four illumination pattern ghost imaging schemes in the one-dimensional case. (a) Original image (128×128 pixel size); (b) imaging results of imaging scheme based on 1D Gauss wavelet ($r=3.5, n=3$); (c) imaging results of imaging scheme based on 1D Mexihat wavelet ($r=2.5, n=3$); (d) imaging results of imaging scheme based on 1D Haar wavelet; (e) imaging results of imaging scheme based on random binary scatter

$$\begin{cases} \hat{\psi}_{k,q}^{a,A} = \psi_{a,q}^{(\Delta)}(y) \otimes \psi_{a,k}^{(\Delta)}(x) \\ \hat{\psi}_{k,q}^{a,H} = \psi_{a,q}^{(\Delta)}(y) \otimes \psi_{a,k}^{(\Delta)}(x) \\ \hat{\psi}_{k,q}^{a,V} = \psi_{a,q}^{(\Delta)}(y) \otimes \psi_{a,k}^{(\Delta)}(x) \\ \hat{\psi}_{k,q}^{a,D} = \psi_{a,k}^{(\Delta)}(y) \otimes \psi_{a,q}^{(\Delta)}(x) \end{cases}, \quad (12)$$

式中: k 和 q 为小波函数沿 x,y 方向上的平移量。

为了清晰地观察到四个系列的散斑图的像素点亮暗分布,给出了零级 $\hat{\psi}_{k,q}^{a,A}, \hat{\psi}_{k,q}^{a,H}, \hat{\psi}_{k,q}^{a,V}, \hat{\psi}_{k,q}^{a,D}$ 小波函数的图像,如图 9 所示,显然小波函数表现出明显的方向性。

二维 Gauss 小波成像方案所需要的测量次数为

$$K = N^2 \times n^2. \quad (13)$$

由于 Mexihat 小波是偶函数,可以通过将一维 Mexihat 小波沿对称轴旋转一周形成二维形式,生成二维 Mexihat 小波照明图样。二维 Mexihat 小波图样的成像方案所需要的测量次数为

$$K = [(N^2 \times n^2) / 3 - 1]. \quad (14)$$

通过数值模拟,比较基于二维 Gauss 小波图样、二维 Mexihat 小波图样、二维 Haar 小波图样和随机二值散斑图样的成像方案的成像结果,如图 10 所示。可以发现,基于二维 Gauss 小波、二维 Mexihat 小波的成像方案都可以正常成像。

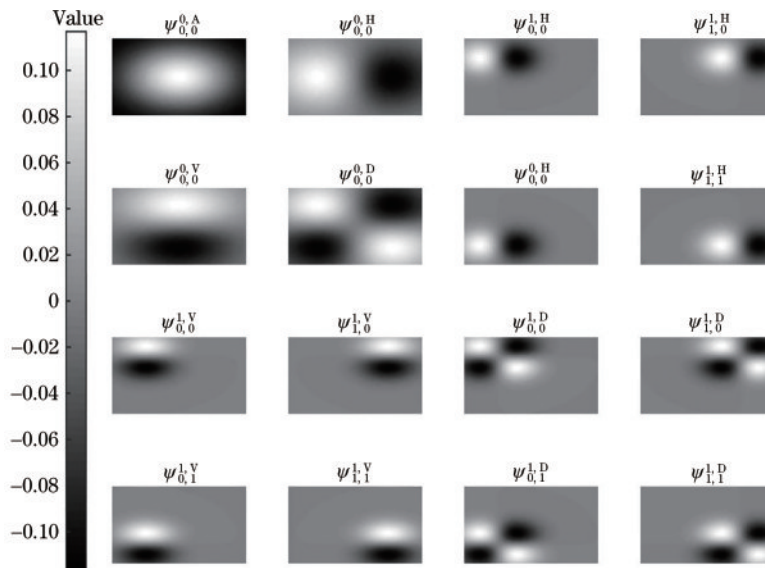


图 9 二维 Gauss 小波零级小波函数的照明图样($n=2$)

Fig. 9 Illumination patterns of the zero-level wavelet functions with 2D Gauss wavelet ($n=2$)

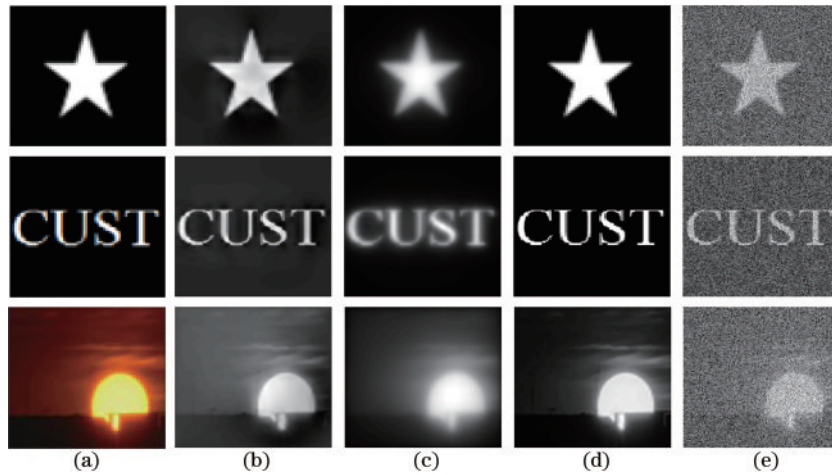


图 10 二维情况下,四种照明图样鬼成像方案的仿真成像结果。(a)原图(128×128像素大小);(b)基于二维 Gauss 小波的成像方案的成像结果($r=3.5, n=2$);(c)基于二维 Mexihat 小波的成像方案的成像结果($r=3, n=2$);(d)基于二维 Haar 小波的成像方案的成像结果;(e)基于随机二值散斑的成像方案的成像结果

Fig. 10 Simulated imaging results of four illumination pattern ghost imaging schemes in the 2D case. (a) Original image (128×128 pixel size); (b) imaging results of imaging scheme based on 2D Gauss wavelet ($r=3.5, n=2$); (c) imaging results of imaging scheme based on 2D Mexihat wavelet ($r=3, n=2$); (d) imaging results of imaging scheme based on 2D Haar wavelet; (e) imaging results of imaging scheme based on random binary scatter

3 实验验证与分析

计算鬼成像具有可调制光源的特性,可以用一组小波基函数来产生计算鬼成像系统的照明图样,并进行计

算成像,所以本文选取标准的计算鬼成像实验系统,如图 11 所示。实验系统中使用到的实验器件包括:计算机(computer)、数字投影仪(projector)、待测物体(target)、收集镜(collecting lens)、桶探测器(bucket detector)。

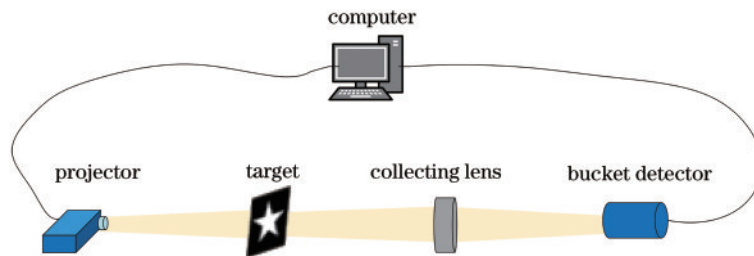


图 11 计算鬼成像的实验装置
Fig. 11 Experimental setup of computing ghost imaging

但在进行计算鬼成像实验时,也出现了两个问题。首先,用 Gauss 小波和 Mexihat 小波生成的照明图样中存在负值,而在实际过程中数字投影仪是无法产生负值光照的。因此在实际操作中,对于存在负值光照的照明图样 R , 可以将其分为两部分 $R = R_+ - R_-$, R_- 仅包含照明图样中负值元素的绝对值,剩余元素包含在 R_+ , 得到相应的桶探测器值 B_- 和 B_+ , 然后再进行二阶关联运算 $G = (R_+ - R_-)(B_+ - B_-)$, 通过该操作可以解决这个问题。其次,另一个问题就是数字投影仪的量化误差。一个数字投影仪的灰度表示能力有限,以一个 8 位的灰度为例,所有的模拟信号将被转换成 8 位数字信号,其中最多只有 256 级灰度可以用投影仪表示。为了能够充分利用有限的灰度级,可以将小波归一化系数从照明图样中分离出来,用非归一化的照明图样对待测物体进行照明,在

进行重构成像时,将归一化系数的平方与桶探测器信号相乘,再进行二阶关联成像。

基于以上理论分析,进行了基于 Gauss 小波图样和 Mexihat 小波图样成像方案的计算鬼成像实验,实验结果如图 12 所示。可以发现:基于一维和二维 Haar 小波图样成像方案的重构图中出现大量噪点,并且重构图的对比度降低;相较于 Haar 小波和随机二值散斑图样的成像方案,基于一维和二维 Gauss 和 Mexihat 小波图样的成像方案的成像效果更好。这与仿真结果图 8 和图 10 相矛盾,分析原因可能是在进行实验时,外界干扰对成像系统产生的影响。而在实验过程中,最常见的外界干扰就是杂散光噪声以及探测器对成像系统的影响。因此通过仿真研究杂散光噪声和探测器的光强-电压呈不同响应关系时对四种照明图样方案的影响。

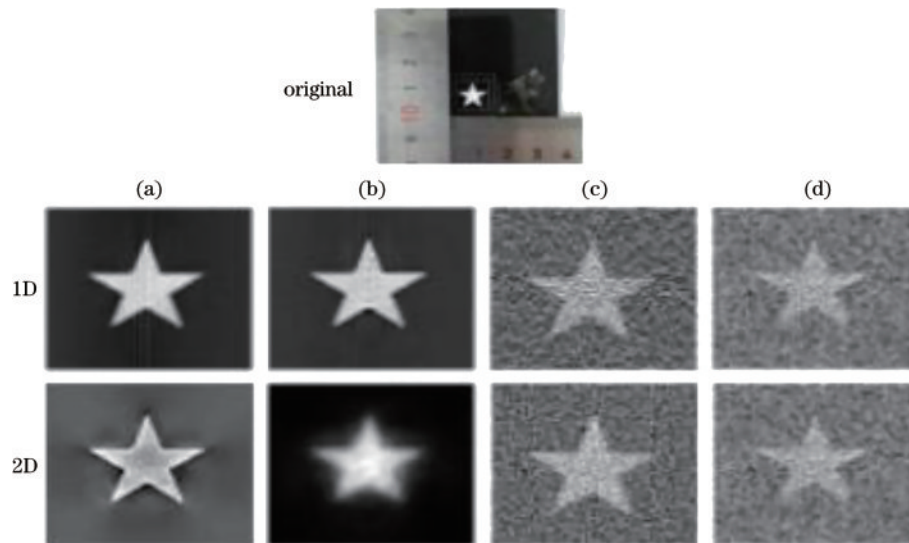


图 12 基于一维和二维四种照明图样鬼成像方案的实验成像结果。(a)基于 Gauss 小波的成像方案的成像结果;(b)基于 Mexihat 小波的成像方案的成像结果;(c)基于 Haar 小波的成像方案的成像结果;(d)基于随机二值散斑的成像方案的成像结果

Fig. 12 Experimental imaging results of four illumination pattern ghost imaging schemes in one and two dimensions. (a) Imaging results of imaging scheme based on Gauss wavelet; (b) imaging results of imaging scheme based on Mexihat wavelet; (c) imaging results of imaging scheme based on Haar wavelet; (d) imaging results of imaging scheme based on random binary scatter

在真实环境中,除了鬼成像所需要的照明以外还会有其他光源存在,这种额外引入且无法准确测量的光信号势必会对鬼成像系统产生干扰,进而影响成像结果。接下来通过数值模拟就杂散光噪声对不同照明图样成像方案的影响进行研究。在数值模拟中,将在区间 $[0, 1]$ 内变化的均匀分布的随机数与一个可调整大小的因子相乘,得到噪声项。由于杂散光噪声对桶探测器来说相当于一个噪声项,因此将桶探测器信号直接与噪声项相加,来模拟外界杂散光噪声对桶探测器信号的影响。

由于杂散光噪声具有随机性,会随着测量次数的增加削弱自身对成像系统的影响,因此对于两个测量次数不相同的成像方案,受到的噪声干扰不在同一个级别上,导致对比结果不公平,因此需要使两者的测量次数相同或者接近。所以这里需要将 Haar 小波的测量次数变为原来的 3 倍或 4 倍,分别对应一维 Gauss 小波成像方案的测量次数($n=3$)和二维 Gauss 小波成像方案的测量次数($n=2$),让不同照明图样成像方案的测量次数接近或相同,使得对比结果更有意义。

通过数值模拟分别计算了在不同噪声强度下,基于 Gauss 小波、Mexihat 小波、Haar 小波和随机二值散斑图样成像方案的重构结果,如图 13 和图 14 所示。

观察重构图 13、14 可以发现:随着噪声的增加,相比于 Haar 小波和随机二值散斑的成像方案,基于一维和二维 Gauss 小波和 Mexihat 小波的成像方案的成像效果更好;当噪声较强时,基于 Gauss 小波的成像方案的重构图会出现噪点;基于 Mexihat 小波的成像方案随着噪声的增强表现出很好的抗噪声能力,这是由于

其用 Mexihat 小波进行连续小波变换本身就能够有效从噪声信号中提取信号^[21],然而相对于其他成像方案,该成像方案的成像分辨率一直较低。相对于 Haar 小波和随机二值散斑,Gauss 小波和 Mexihat 小波成像方案都表现出更强的抗噪声能力,且 Gauss 小波和 Mexihat 小波成像方案仍各有利弊。

除了外界噪声可能会干扰成像结果以外,在实验过程中信号采集系统对成像结果的干扰也很显著。一般情况下,探测器输出光电压应与输入光功率呈线性关系,此时可以进行较好成像。但探测器未校准使桶探测器的光强-电压不是线性关系时,会对成像结果产生影响。通过数值模拟,研究当探测器的光强-电压呈现不同响应曲线关系时,基于 Gauss 小波、Mexihat 小波和 Haar 小波成像方案的成像效果,如图 15 所示。这里选取两种响应曲线(凹函数、凸函数),如图 15(a)所示,其中横轴代表相对光强 I ,纵轴代表当前光照强度下探测器所输出的电压值 U 。从图 15 可以发现,在两种不同的响应曲线下,相比一维和二维 Haar 小波成像方案,一维和二维 Gauss 小波和 Mexihat 小波成像方案的重构效果更好,表现出更强抗干扰能力。

基于上述讨论,当存在外界噪声污染和探测器的光强-电压响应偏离线性响应的情况下,所提成像方案相对于 Haar 小波方案表现出更强的抗干扰能力和抗噪声能力,这有利于计算鬼成像在实际过程中的应用。

4 结 论

提出一种准连续变换方式,将连续小波引入到计

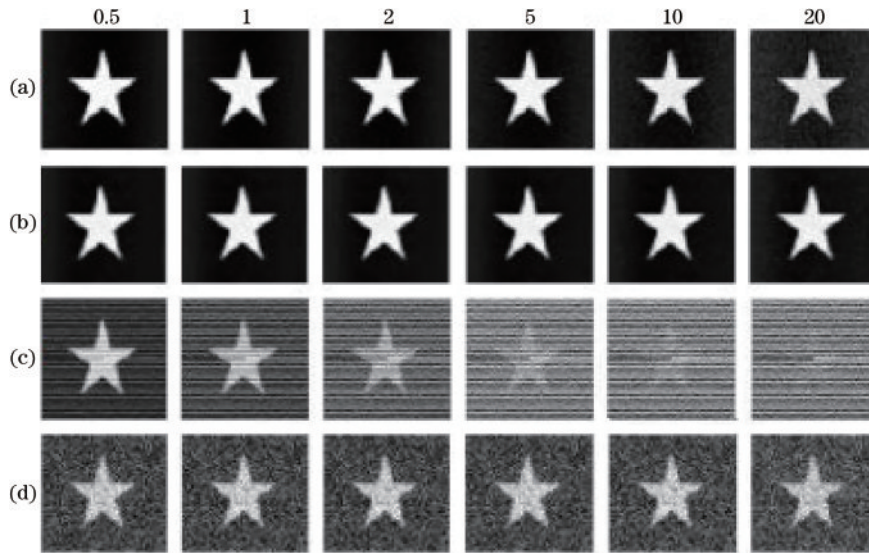


图 13 在不同噪声因子下,一维下四种照明图样鬼成像方案的经归一化二阶关联处理的仿真成像结果。(a)基于一维 Gauss 小波图样的鬼成像方案的成像结果($r=3.5, n=3$),重构次数为 12285;(b)基于一维 Mexihat 小波图样的鬼成像方案的成像结果($r=2.5, n=3$),重构次数为 12285;(c)基于一维 Haar 小波图样的鬼成像方案的成像结果,重构次数为 12288;(d)基于随机二值散斑图样的鬼成像方案的成像结果,重构次数为 12288

Fig. 13 Simulated imaging results of four illumination pattern ghost imaging schemes in one dimension under different noise factors (normalized second-order correlation processing). (a) Imaging results of ghost imaging scheme based on 1D Gauss wavelet pattern ($r=3.5, n=3$), number of reconstructions is 12285; (b) imaging results of ghost imaging scheme based on 1D Mexihat wavelet pattern ($r=2.5, n=3$), number of reconstructions is 12285; (c) imaging results of ghost imaging scheme based on 1D Haar wavelet pattern, number of reconstructions is 12288; (d) imaging results of ghost imaging scheme based on random binary scatter pattern, number of reconstructions is 12288

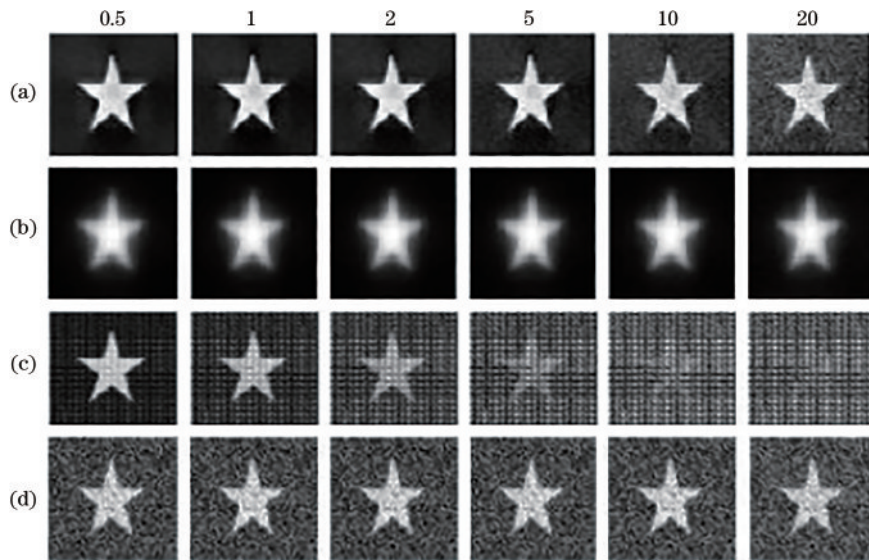


图 14 在不同噪声因子下,二维下四种照明图样鬼成像方案的经归一化二阶关联处理的仿真成像结果。(a)基于二维 Gauss 小波图样的鬼成像方案的成像结果($r=3.5, n=2$),重构次数为 16384;(b)基于二维 Mexihat 小波图样的鬼成像方案的成像结果($r=3, n=2$),重构次数为 16380;(c)基于二维 Haar 小波图样的鬼成像方案的成像结果,重构次数为 16384;(d)基于随机二值散斑图样的鬼成像方案的成像结果,重构次数为 16384

Fig. 14 Simulated imaging results of four illumination pattern ghost imaging schemes in two dimension under different noise factors (normalized second-order correlation processing). (a) Imaging results of ghost imaging scheme based on 2D Gauss wavelet pattern ($r=3.5, n=2$), number of reconstructions is 16384; (b) imaging results of ghost imaging scheme based on 2D Mexihat wavelet pattern ($r=3, n=2$), number of reconstructions is 16380; (c) imaging results of ghost imaging scheme based on 2D Haar wavelet pattern, number of reconstructions is 16384; (d) imaging results of ghost imaging scheme based on random binary scatter pattern, number of reconstructions is 16384

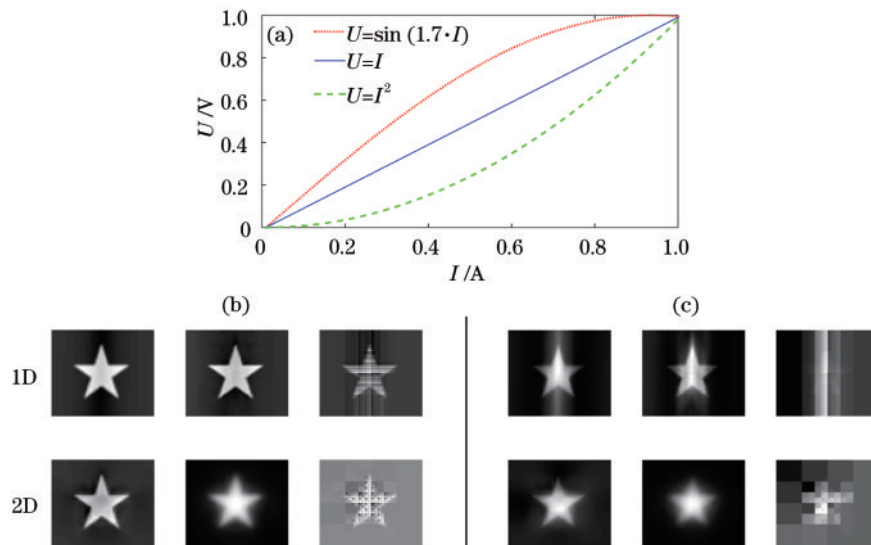


图 15 在探测器的光强-电压响应偏离线性响应情况下,不同成像方案的仿真成像结果。(a)探测器对光照强度的三种不同形式的响应曲线;(b) $U = \sin(1.7 \times I)$ 情况下,基于 Gauss 小波图样、Mexihat 小波图样和 Haar 小波图样的鬼成像方案的成像结果,测量次数分别是 12285, 12285, 4096;(c) $U = I^2$ 情况下,基于 Gauss 小波图样、Mexihat 小波图样和 Haar 小波图样的鬼成像方案的成像结果,测量次数分别是 16384, 5460, 4096

Fig. 15 Simulated imaging results of imaging schemes when the light intensity-voltage response of the detector deviates from the linear response. (a) Three different forms of response curves of detector to light intensity; (b) under $U = \sin(1.7 \times I)$, imaging results of the Gauss wavelet pattern, Mexihat wavelet pattern, and Haar wavelet pattern ghost imaging schemes, respectively, with number of measurements of 12285, 12285, 4096; (c) under $U = I^2$, imaging results of the Gauss wavelet pattern, Mexihat wavelet pattern, and Haar wavelet pattern ghost imaging schemes, respectively, with number of measurements of 16384, 5460, 4096

算鬼成像系统中,并构建了基于二维连续小波的照明图样和成像系统。通过仿真与实验结果验证了基于 Gauss 小波图样和 Mexihat 小波图样的成像方案都能正常成像。除此之外,通过仿真结果表明,相较于 Haar 小波图样成像方案,基于 Gauss 小波图样和 Mexihat 小波图样的成像方案更能抵抗外界噪声和探测器对成像系统所带来的影响,所以所提成像方案相比于 Haar 小波成像方案更有利于推进鬼成像的实用化发展。

参 考 文 献

- [1] Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
- [2] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. Physical Review A, 2009, 79(5): 053840.
- [3] Hardy N D, Shapiro J H. Reflective ghost imaging through turbulence[J]. Physical Review A, 2011, 84(6): 063824.
- [4] Strekalov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, et al. Observation of two-photon "ghost" interference and diffraction[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(18): 3600-3603.
- [5] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 113601.
- [6] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25): 253603.
- [7] Li M F, Zhang Y R, Luo K H, et al. Time-correspondence differential ghost imaging[J]. Physical Review A, 2013, 87(3): 033813.
- [8] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y. Turbulence-free ghost imaging[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(11): 111115.
- [9] 孙宝清, 王玉鹏. 时域鬼成像及其应用[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1212001.
- [10] 孙宝清, 王玉鹏. Temporal ghost imaging and its application[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1212001.
- [11] 赵延庚, 董冰, 刘明, 等. 可抑制大气湍流影响的深度学习计算鬼成像[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1111001.
- [12] Zhao Y G, Dong B, Liu M, et al. Deep learning based computational ghost imaging alleviating the effects of atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1111001.
- [13] 胡洋岷, 程正东, 梁振宇, 等. 激光关联成像在烟幕条件下的实验研究[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401020.
- [14] Hu Y D, Cheng Z D, Liang Z Y, et al. Experimental study on laser computational ghost imaging through smoke media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401020.
- [15] Kuplicki K, Chan K W C. High-order ghost imaging using non-Rayleigh speckle sources[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26766-26776.
- [16] Shibuya K, Nakae K, Mizutani Y, et al. Comparison of

- reconstructed images between ghost imaging and Hadamard transform imaging[J]. *Optical Review*, 2015, 22(6): 897-902.
- [14] 周成, 黄贺艳, 刘兵, 等. 基于混合散斑图的压缩计算鬼成像方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911001.
Zhou C, Huang H Y, Liu B, et al. Hybrid speckle-pattern compressive computational ghost imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911001.
- [15] Si X F, Zhang W W, Chen Q, et al. Image quality evaluation of high-order ghost imaging[C]//*Imaging and Applied Optics 2014*, July 13-17, 2014, Seattle, Washington. Washington, D.C.: OSA, 2014: IM2C.4.
- [16] 李梦颖. 基于小波变换的鬼成像技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Li M Y. Research on wavelet transform-based ghost imaging techniques[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [17] Chen J, Gong W L, Han S S. Sub-Rayleigh ghost imaging via sparsity constraints based on a digital micro-mirror device[J]. *Physics Letters A*, 2013, 377(31/32/33): 1844-1847.
- [18] Yu W K, Li M F, Yao X R, et al. Adaptive compressive ghost imaging based on wavelet trees and sparse representation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7133-7144.
- [19] Dai H D, Gu G H, He W J, et al. Adaptive compressed sampling based on extended wavelet trees[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6619-6628.
- [20] Xi M J, Chen H, Yuan Y, et al. Bi-frequency 3D ghost imaging with Haar wavelet transform[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32349-32359.
- [21] 薛泽春, 李永刚, 李连之, 等. 应用连续墨西哥帽小波变换对弱信号提取分析研究[J]. *重庆文理学院学报(自然科学版)*, 2012, 31(5): 79-82, 90.
Xue Z C, Li Y G, Li L Z, et al. Study of extract and analysis of weak signals by using continuous Mexican hat wavelet transform[J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Natural Science Edition)*, 2012, 31(5): 79-82, 90.