

引用格式: WANG Xiao-xia, TAO Yong, YANG Feng-bao, *et al.* An Optimization Method of Ghost Imaging Based on Multiple Speckle Patterns Combination-modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1210001
王肖霞,陶勇,杨风暴,等. 基于多散斑图组合-调制的鬼成像优化方法[J]. *光子学报*, 2020, 49(12):1210001

基于多散斑图组合-调制的鬼成像优化方法

王肖霞¹,陶勇¹,杨风暴¹,习江涛^{1,2}

(1 中北大学 信息与通信工程学院,太原 030051)

(2 伍伦贡大学 电气计算机与通信工程学院,澳大利亚 伍伦贡 NSW2522)

摘 要:利用多个散斑图组合的方式提出了一种新的鬼成像优化方法.利用桶探测器值的大小对照射到目标物体上的多个散斑图进行排序,使相邻散斑图间差异性减小;通过对相邻散斑图间的叠加以及对应桶探测器值的调制,有效降低待关联数据间冗余和数量,并利用不同的关联运算规则实现对目标物体的重构.数值仿真结果表明,对于目标图像,在总采样次数 4 000 次、4 个相邻散斑图组合方式下,所提方法与未组合-调制下传统鬼成像、差分鬼成像和正负调制鬼成像相比,其峰值信噪比/对比度分别提升了 21.7%/27.3%、8.3%/17.8% 和 14.7%/25.7%;通过对 20 幅目标图像的数值模拟与结果分析,发现峰值信噪比/对比度提升率在 15% 和 30% 以上的占比分别为 90%/85% 和 50%/55%,说明该方法具有较好的普适性和推广价值.

关键词:鬼成像;多散斑图;组合-调制;优化;重构

中图分类号:O431.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204912.1210001

An Optimization Method of Ghost Imaging Based on Multiple Speckle Patterns Combination-modulation

WANG Xiao-xia¹, TAO Yong¹, YANG Feng-bao¹, XI Jiang-tao^{1,2}

(1 School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2 School of Electrical Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong, Wollongong NSW2522, Australia)

Abstract: A new optimization method of ghost imaging by combining multiple speckle patterns was proposed. Firstly, the multiple speckle patterns irradiated on the target object are sorted to reduce the difference between adjacent speckle patterns in the order of smallest to largest in the value of the bucket detector. Secondly, the adjacent speckle patterns are combined to create a new speckle pattern, and the corresponding values of the bucket detector are modulated to a new bucket detector value. This process enables effectively reduce the redundancy and number of data to be associated. Finally, using three different correlation calculation rules to reconstruct of the target object. Numerical simulation results show that for the grayscale image, the proposed method with 4 000 measurements has a higher peak value than traditional ghost imaging, differential ghost imaging, and positive-negative ghost imaging under uncombined and modulated case. The peak signal-to-noise ratio/contrast has been improved by 21.7%/27.3%, 8.3%/17.8% and 14.7%/25.7%, respectively. Through the numerical simulation and result analysis of 20 target images, it is found that 90%/85% and 50%/55% of peak signal-to-noise ratio/contrast enhancement rates are above 15% and 30% respectively, and it shows that the proposed method has good universality and popularization value.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61503345, 61272472, 61972363),山西省应用基础研究计划青年科技研究基金(No.201901D211233)

第一作者(通讯作者):王肖霞(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为关联成像技术、不确定性信息处理等. Email: wangxiaoxia@nuc.edu.cn

收稿日期:2020-07-22;录用日期:2020-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Ghost imaging; Multiple speckle patterns; Combination-modulation; Optimization; reconstitution

OCIS Codes: 100.3010; 110.3010; 010.1080

0 引言

鬼成像技术是一种利用空间强度关联原理对目标物体信息进行重构的间接成像方法^[1-6],可突破传统成像中光能量不足所导致的阵列式探测器难以响应的局限,具有抗干扰性强、作用距离远、全天候监控等独特优势,在夜间城市安防与监控、工业/医学超低辐射计算机断层扫描(Computer Tomography, CT)影像等领域具有广泛的应用前景.与传统的成像方式相比,鬼成像技术的探测过程和重构过程是完全分离的,其中探测过程主要是通过改变照射在目标区域的散斑图来获得桶探测器的测量值,而重构则是通过对散斑图与测量值间的关联运算来实现对目标鬼像的间接重构.在整个成像过程中,原则上照射在被照物体上的每幅独立散斑图之间必须具有显著的差异性,只有这样才能在非物体光路上获得目标物体的高质量鬼像.例如:文献[7-10]中分别提出了一种基于Hadamard衍生图的鬼成像方法,其主要思想是利用Hadamard测量矩阵来生成系列正交散斑图.2015年,MAHDI KHAMOUSHI S M等^[11]通过将傅里叶级数进行频域分解,提出并验证了正弦鬼成像(Sinusoidal Ghost Imaging, SGI)的可操作性.课题组人员通过将两个正交的倾斜正弦散斑图案叠加的方式,提出了一种基于正交化正弦散斑的计算鬼成像方法^[12].这些方法都证实了利用正交化散斑图照射目标物体可以有效提升鬼成像质量,且从理论上来说在满采样前提下可以完全重构出目标物体,这无疑对于鬼成像的实用化推广具有重要意义.其基本思想主要是利用大差异散斑图来照射目标物体,使关联数据间冗余度降低,以起到提升鬼成像质量的目的.

然而,在夜间城市安防、工业/医学CT影像等实际探测过程中,由于受夜间光强的限制、超低辐射(如X射线等)调制器研制的局限等,在利用光补偿或调制等方式生成的正交化散斑图来照射目标物体时,常常会造成侦察暴露、灯光扰民以及诱发工作人员或患者癌变风险等“光污染”现象出现.尤其是对于夜间具有反侦察能力的犯罪嫌疑人/敌方来说,被侦察对象常常会采取更加隐秘的方式来进行对抗或进行干扰,以破坏整个探测.同时,由于随机散斑图间的差异较难凸显,使得关联重构时目标物体的空间信息常常难以被有效挖掘,以至于成像效果差.因此,在某些特定环境或条件下,如何对探测的系列随机散斑图和桶探测器值进行相应预处理来获得大差异度的关联数据是提升鬼成像质量的关键.

鉴于以上分析,本文以随机散斑图为前提,通过对多个散斑图间组合以及其对应桶探测器值间的调制变换,提出了一种利于凸显关联数据间差异的多散斑图组合-调制方法,并将其用于鬼成像质量的优化中.主要思想是通过将多个散斑图进行排序和组合的方式来提高相邻散斑图间差异显著性;利用对应桶探测器值的调制来有效增强数据间差异.通过数值仿真,分析了散斑图组合个数的设置方法,利用峰值信噪比、对比度等定量评价指标验证了所提方法的有效性和普适性.

1 多散斑图组合问题的提出

设随机散斑场环境下,用于照射目标物体的第 m 个随机散斑图案为 $I_{am}(x, y)$ (其中 $m = 1, 2, \dots, K$),经被照物体后的桶探测器值为 I_{bm} ,则利用传统二阶关联鬼成像^[1-6](Traditional Ghost Imaging, TGI)、差分鬼成像^[13-14](Differential Ghost Imaging, DGI)、正-负鬼成像^[15-19](Positive-Negative Ghost Imaging, P-NGI)等方法便可对目标物体进行重构,具体为

$$G' = \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K [I_{am}(x, y) \cdot I_{bm}] & \text{TGI} \\ \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K [I_{am}(x, y) \cdot I_{bm}] - \left(\frac{\sum_{m=1}^K I_{bm}}{\sum_{m=1}^K [\sum I_a(x, y)]} \right) \times \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K [I_{am}(x, y) \cdot I_{bm}] & \text{DGI} \\ \frac{1}{K} \sum_{m=1}^{K^*} I_{am}^*(x, y) \cdot f \left(\frac{I_{bm}^*}{\sum_{m=1}^{K^*} I_{bm}^*} \right) & \text{P-NGI} \end{cases} \quad (1)$$

式中, G' 为重构后鬼像;*为+或-,为+时 G' 为正像,否则为负像; $f(\cdot)$ 为调制函数,一般可取对数、幂指

数、正(余)弦等函数.

为了衡量随机散斑图间的相似性,以稀疏的10个高斯散斑束来随机的组成不同的散斑图,散斑图的尺寸大小为 64×64 ,且每幅散斑图中散斑束的位置点都是随机的,散斑束的强度服从高斯分布.生成的某散斑图及高斯散斑束的强度分布如图1所示.

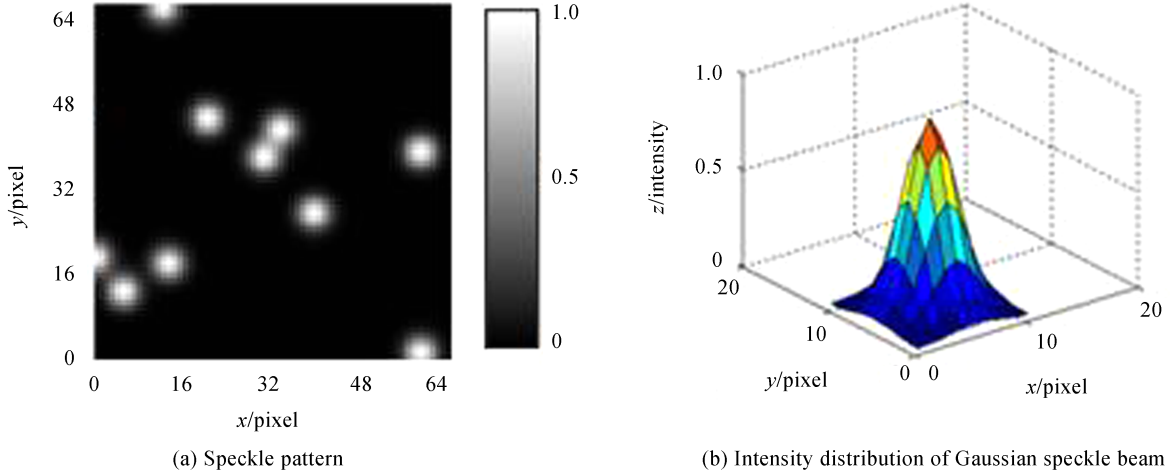


图1 散斑图及高斯散斑束的强度分布

Fig.1 Speckle pattern and intensity distribution of Gaussian speckle beam

当散斑图的数量为 K 时,便可利用距离的大小来描述散斑图间的相似度.其过程主要包括两部分:一是依据桶探测器值 $I_{bm}(m=1, 2, \dots, K)$ 从小到大的顺序对其对应的散斑图 $I_{am}(x, y)$ 进行排序;二是利用欧式距离对排序后的任意相邻两幅散斑图间的距离进行计算,并获得其平均距离矩阵.当 $K=4000$ 时,平均距离矩阵为

$$E_{64 \times 64} = \begin{bmatrix} 0.0466 & 0.0585 & \dots & 0.0546 & 0.0444 \\ 0.0592 & 0.0742 & \dots & 0.0684 & 0.0553 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.0563 & 0.0727 & \dots & 0.0663 & 0.0519 \\ 0.0420 & 0.0551 & \dots & 0.0532 & 0.0416 \end{bmatrix}$$

对平均距离矩阵所有元素求和后取平均得

$$\frac{1}{64 \times 64} \sum E_{64 \times 64} = 0.1036$$

这说明相邻随机散斑图间的距离相对较小,即散斑图间的相似度较高.因此,只能通过增加采样次数的方式来提升鬼像质量,但这势必会增加探测和重构的时间.

原则上来说,当采样次数一定时,增大散斑图间的差异性也可以提升鬼像质量.因此,为了减小随机散斑图间的相似度,本文利用叠加组合的形式对相邻散斑图进行变换.在此以4个相邻散斑图间叠加组合为例来进行介绍,组合后的平均距离矩阵为

$$E'_{64 \times 64} = \begin{bmatrix} 0.1643 & 0.2037 & \dots & 0.2010 & 0.1685 \\ 0.2047 & 0.2530 & \dots & 0.2447 & 0.2047 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.2027 & 0.2557 & \dots & 0.2234 & 0.1787 \\ 0.1547 & 0.1995 & \dots & 0.1849 & 0.1472 \end{bmatrix}$$

对平均距离矩阵所有元素求和后取平均得

$$\frac{1}{64 \times 64} \sum E'_{64 \times 64} = 0.3162 > 0.1036$$

由上可知,经过对相邻散斑图间的组合后,散斑图间的差异性较未组合前增大了3.05倍,这无疑对鬼成像质量的提升是有利的.然而,随着相邻散斑图组合个数的增加,组合后的新散斑图数量势必会降低,当新散斑图数量下降到一定程度时,从鬼成像原理上来说并不利于成像.也就是说,相邻散斑图的组合个数并非越大越好.

2 多散斑图组合-调制的鬼成像优化方法

2.1 所提方法的具体实现过程

多散斑图组合-调制的鬼成像优化方法的原理示意图如图2所示.其中,系列随机散斑图由激光照射到空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)上来模拟实际探测环境下的光场; $I_{a1}, I_{a2}, \dots, I_{aK}$ 为原始照射目标物体的散斑图, $I_{b1}, I_{b2}, \dots, I_{bK}$ 为对应的桶探测器值; $I'_{b1}, I'_{b2}, \dots, I'_{bK}$ 为按照从小到大排序后的桶探测器值顺序,其对应的散斑图序列为 $I'_{a1}, I'_{a2}, \dots, I'_{aK}$; l (l 为常数)为相邻散斑图的组合个数,称为组合长度,通常情况下, K 为 l 的整数倍; I'_b, I'_a 分别为组合-调制后的桶探测器值和散斑图序列.

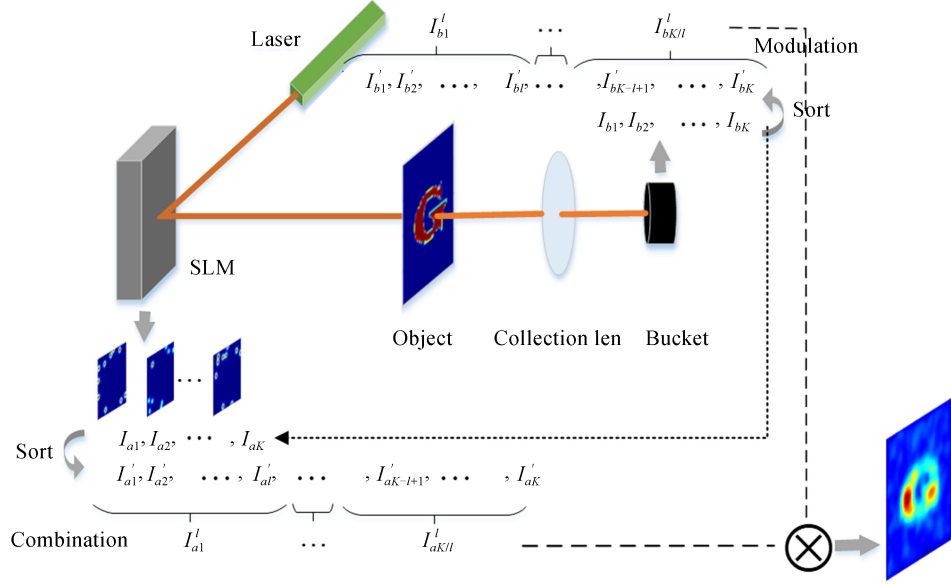


图2 本文方法示意图
Fig.2 Schematic diagram of this paper

图2的实现过程主要包括排序、组合、调制和关联四个部分,具体为

1)根据测量到的桶探测器值 I_{bm} 的大小,将其按照从小到大的顺序进行排序 $\{I'_{b1}, I'_{b2}, \dots, I'_{bK}\}$,并以此为依据,对其对应的散斑图 $I_{am}(x, y)$ 也进行重新排列 $\{I'_{a1}, I'_{a2}, \dots, I'_{aK}\}$,使相邻散斑图间的差异性降低.

2)将排序后的散斑图序列按照从左到右的顺序,将相邻的 l ($l \in [2, K]$)幅散斑图进行叠加组合,形成一个新的散斑图序列 $\{I'_{a1}, I'_{a2}, \dots, I'_{a(K/l)}\}$,降低待关联数据间的冗余和数量.第 i 个新生成的散斑图为

$$I'_{ai} = I'_{a(l \times i - l + 1)} + I'_{a(l \times i - l + 2)} + \dots + I'_{a(l \times i)} \quad (2)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, K/l$.

3)将叠加组合的 l 幅散斑图所对应的桶探测器值进行乘性调制,得到一个新的桶探测器序列值 $\{I'_{b1}, I'_{b2}, \dots, I'_{b(K/l)}\}$,则第 i 个新生成的桶探测器值为

$$I'_{bi} = I'_{b(l \times i - l + 1)} \times I'_{b(l \times i - l + 2)} \times \dots \times I'_{b(l \times i)} \quad (3)$$

4)利用TGI、DGI以及P-NGI等鬼成像方法对新获得的散斑图序列 I'_{ai} 和桶探测器值序列 I'_{bi} 进行关联运算,以获得鬼像.

$$G'_l = \begin{cases} \frac{l}{K} \sum_{i=1}^{K/l} [I'_{ai}(x, y) \cdot I'_{bi}] & \text{TGI} \\ \frac{l}{K} \sum_{i=1}^{K/l} [I'_{ai}(x, y) \cdot I'_{bi}] - \left\{ \sum_{i=1}^{K/l} I'_{bi} / \sum_{i=1}^{K/l} [I'_{ai}(x, y)] \right\} \times \frac{l}{K} \sum_{i=1}^{K/l} [I'_{ai}(x, y) \cdot I'_{bi}] & \text{DGI} \\ \frac{l}{K} \sum_{i=1}^{(K/l)^*} I'_{ai}(x, y) \cdot f \left(I'_{bi} / \sum_{i=1}^{(K/l)^*} I'_{bi} \right) & \text{P-NGI} \end{cases} \quad (4)$$

式中, G' 为组合调制后的重构鬼像;*为+或-,为+时 G' 为正像,否则为负像; $f(\cdot)$ 为调制函数,一般可取对数、幂指数、正(余)弦等函数.

特殊地,当组合长度 $l=1$ 时,相当于未对散斑图进行组合-调制,式(4)等价于式(1);当组合长度与总采样次数相等时,即 $l=K$ 时,相当于把所有的散斑图都组合到了一起,此时是无法进行关联重构的.可见,随着组合长度 l 的增大,鬼像质量的提升程度并非逐渐增加,而是呈现先增大后减小的变化趋势.研究发现,组合长度 $l \in [2, 8]$ 时重构鬼像质量较高,具体的选取依据将在第3数值模拟与分析部分的3.1节进行介绍.

2.2 评价指标

为了更客观地说明所提方法的成像质量,文中利用峰值信噪比、对比度两个评价指标来对重构的鬼像进行定量评价,具体为

1) 峰值信噪比

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}_G^2}{\text{MSE}} \right) \quad (5)$$

式中, $\text{MSE} = \frac{1}{xy} \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y [G'(i, j) - G(i, j)]^2$ 为均方误差, x 和 y 为重构图像的尺寸; MAX_G^2 为鬼像中最大灰度值.

2) 对比度

参照 Michelson 对比度^[20]对鬼成像中的对比度 v 进行定义,即

$$v = \frac{G_p - G_v}{G_p + G_v} \quad (6)$$

式中, G_p 和 G_v 分别为重构鬼像灰度值曲线上的峰值和谷值.

3 数值模拟与分析

为了验证文中所提方法的有效性,本节以4 000幅 64×64 尺寸的随机散斑图来照射目标物体,并通过与未进行组合-调制前TGI、DGI和 $f(\cdot) = \log_2(\cdot)$ 时P-NGI结果进行对比分析,来说明所提方法在鬼像质量提升方面的优势.

3.1 某特定目标图像的重构及结果分析

以未知目标图像“G”为例,利用不同的鬼成像方法分别对未组合-调制前和组合-调制后的目标图像分别进行重构,并对鬼像某一维度上的灰度值曲线进行绘制,结果如图3所示,该实验中组合步长 $l=4$.在此绘制灰度值曲线的目的是为了分析和计算不同鬼像结果的对比度.图3中,(a)~(d)分别为待重构的目标图像、TGI重构结果、DGI重构结果和基于 $\log_2(\cdot)$ 调制的P-NGI正像重构结果;(f)~(h)分别为三种方法重构后所对应鬼像第31列像素转置后灰度值的分布图;(i)~(l)分别为待重构的目标图像、组合长度为4时,本文分别结合TGI、DGI和基于 $\log_2(\cdot)$ 调制的P-NGI方法后所重构的鬼像结果;(m)~(p)为(i)~(l)鬼像所对应的第31列像素转置后灰度值的分布图.为了便于图题标识,图3(j)~(l)中组合-调制(Combination-Modulation)表示为C-M.

由图3可知,本文方法的重构结果可以较清晰地区分出物体区域和背景区域.利用式(6)分别计算(b)~(d)中鬼像的峰值信噪比分别为10.975 1、13.525 2和11.959 4,而经过多散斑图组合-调制后(j)~(l)中鬼像的峰值信噪比分别为13.356 7、14.647 8和13.722 5.可见,散斑图经过组合-调制后再利用不同鬼成像方法所得到的峰值信噪比都得到了提升,提升度分别为21.7%、8.3%和14.7%.根据灰度值曲线(f)~(h),利用式(5)计算可得目标图像和未组合-调制前(b)~(d)中鬼像的对比度分别为1、0.33、0.45和0.35;而根据灰度值曲线(n)~(p)可知,经过多散斑图组合-调制后(j)~(l)中鬼像的对比度分别提升到了0.42、0.53和0.44.经比较发现,散斑图经过组合-调制后对比度较未组合-调制前分别提升了27.3%、17.8%和25.7%.

上述实验中采用的组合长度 l 为4,但实际上当组合长度的取值不同时,重构鬼像间也会产生差异.为了便于组合长度的合理设置,下面对不同组合长度下重构鬼像的对比度和信噪比进行分析,对应曲线图分别如图4和图5所示.其中,图4(b)、5(b)分别是在图4(a)、5(a)的基础上将横坐标变换为对数显示后所得曲

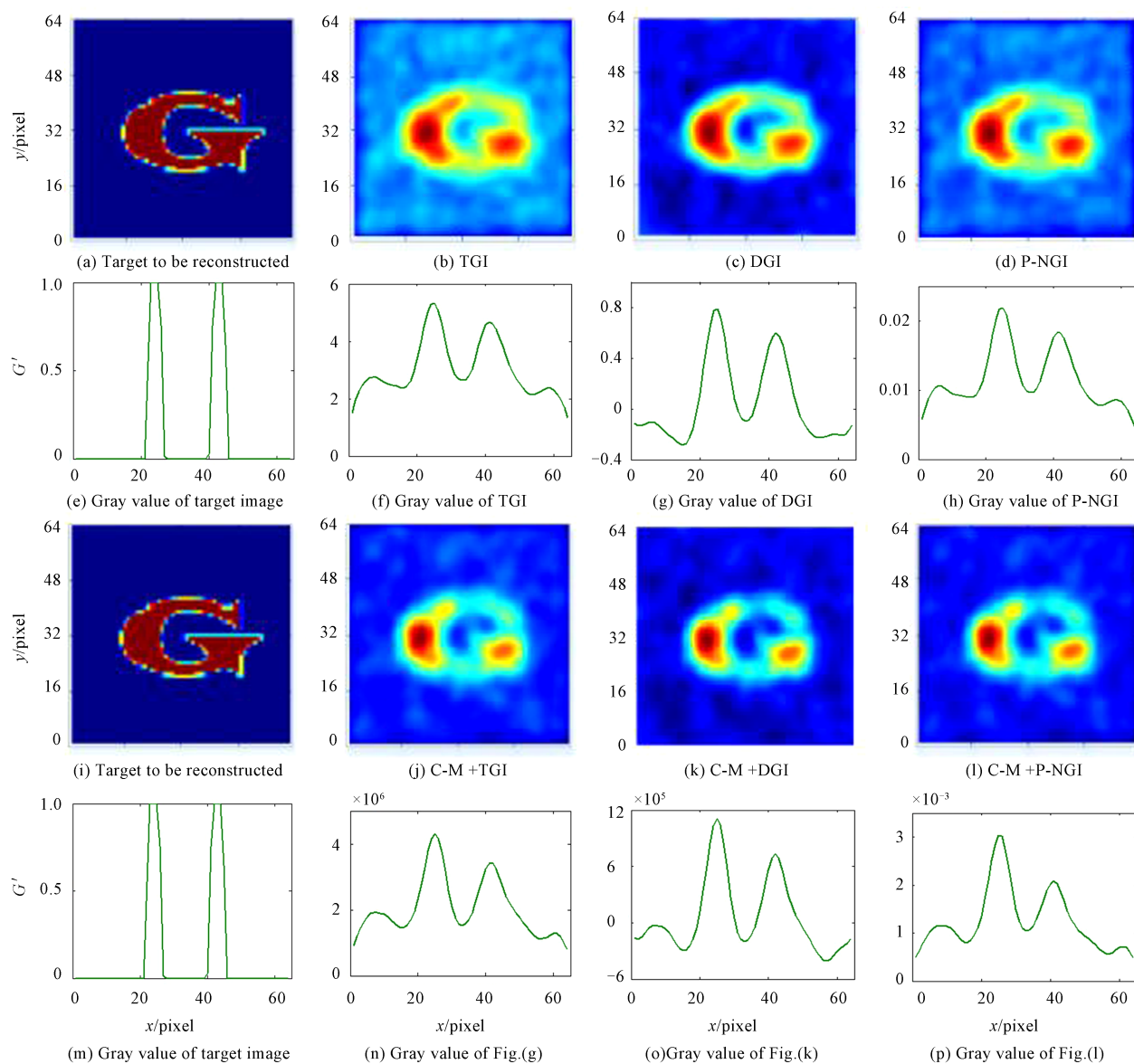


图3 不同方法数值模拟结果
Fig.3 Numerical simulation results of different methods

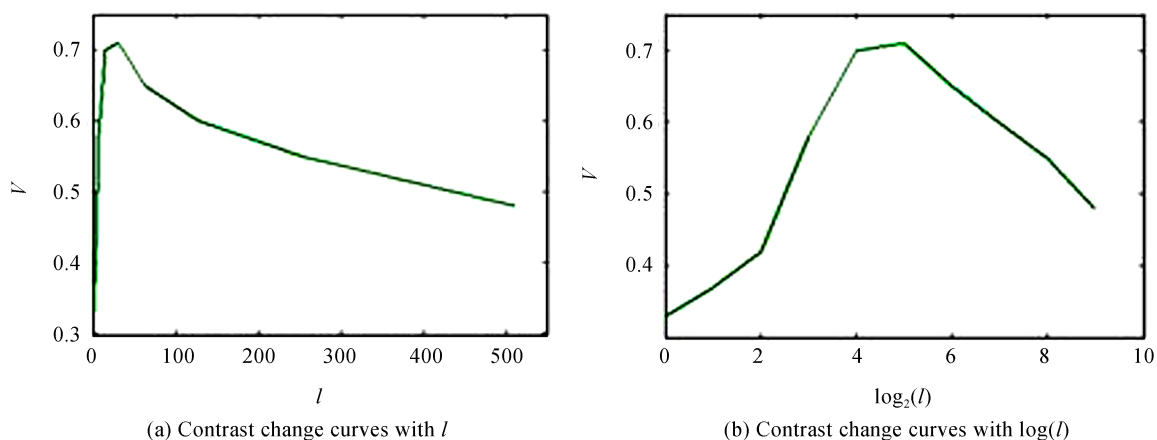


图4 不同组合长度下重构鬼像的对比度曲线
Fig.4 Contrast curves with different l

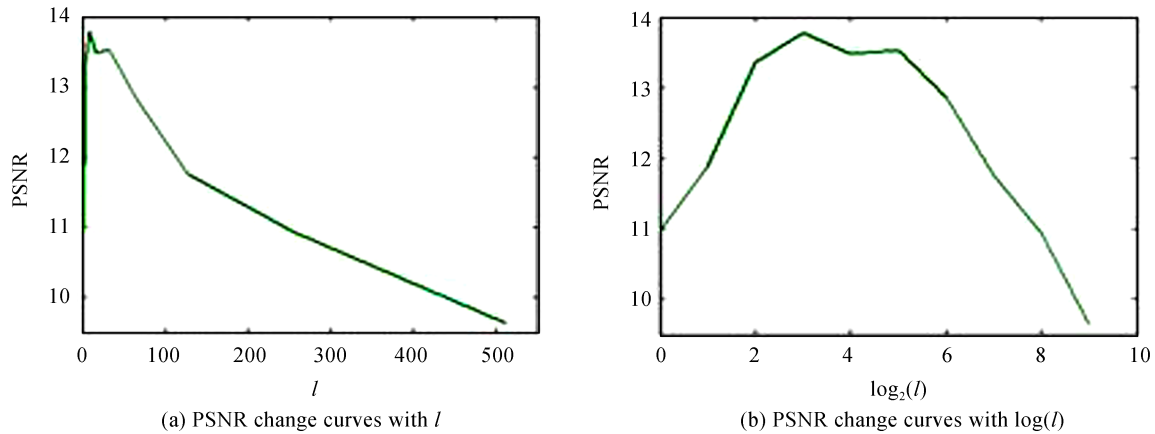


图5 不同组合长度下重构鬼像的峰值信噪比曲线
Fig.5 PSNR curves with different l

线,主要目的是更详细的给出图4(a)、5(a)中曲线在上升阶段与 l 的对应关系.

结合图4和图5可见,当 $\log_2(l)$ 取值范围为 $[1, 3]$ 时,重构图像的对比度和峰值信噪比曲线都呈现持续上升的阶段,而当 $\log_2(l) \geq 4$ 时,峰值信噪比呈现下降趋势.同时,由于待重构数据的数据量大小与成像质量息息相关,且随着数据量的增大,成像质量越来越好,因此当 $\log_2(l) \geq 4$ 时,随着取值的增大,待重构数据的数据量越少,并不利于成像质量的提升,即 l 并非越大越好.

综上所述,当 $\log_2(l) \in [1, 3]$,即 $l \in [2, 8]$ 时,鬼像的对比度和峰值信噪比都较高,且待重构数据的数据量也较大,更利于成像.因此,文中建议组合长度 l 在 $[2, 8]$ 之间取值.

从图4和图5中曲线的整体趋势来看,当组合长度 l 逐步增大时,对比度和峰值信噪比曲线均呈现先增加再减少的变化趋势,且取最大值的区间范围大致相同.这说明在同一合适的组合长度下,鬼像的峰值信噪比和对比度都较大,不需要对两者的取舍进行权衡.

为了说明图4~5变化趋势对于其它目标物体的适用性,以5个不同目标物体为例来进行说明,且不同组合长度下重构鬼像的对比度与峰值信噪比曲线如图6所示.

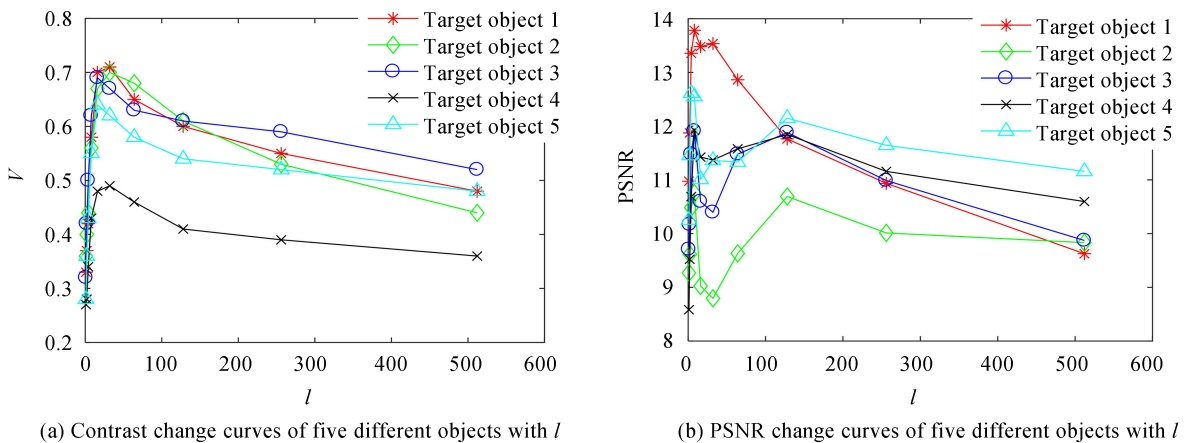


图6 不同组合长度下不同目标重构鬼像的对比度和峰值信噪比曲线
Fig.6 Contrast curves and PSNR curves with different l for different target

由图6可知,对于不同的目标物体来说,虽然不同组合长度下目标鬼像的对比度和峰值信噪比曲线存在差异,但整体的变化趋势却类似,都呈现先增加再降低的变化趋势,这与2.1节中的理论分析结论相符.

为了对组合长度 l 进行合理的选取和设置,以目标图像“G”为例,对峰值附近(l 在2~32)区域内的重构鬼像进行分析,并以2、4、8、16和32等不同组合长度为例,利用TGI对不同组合长度下的散斑图和桶探测器进行关联运算,且重构后的目标鬼像和灰度值分布分别如图7(a)~(e)和(f)~(j)所示.

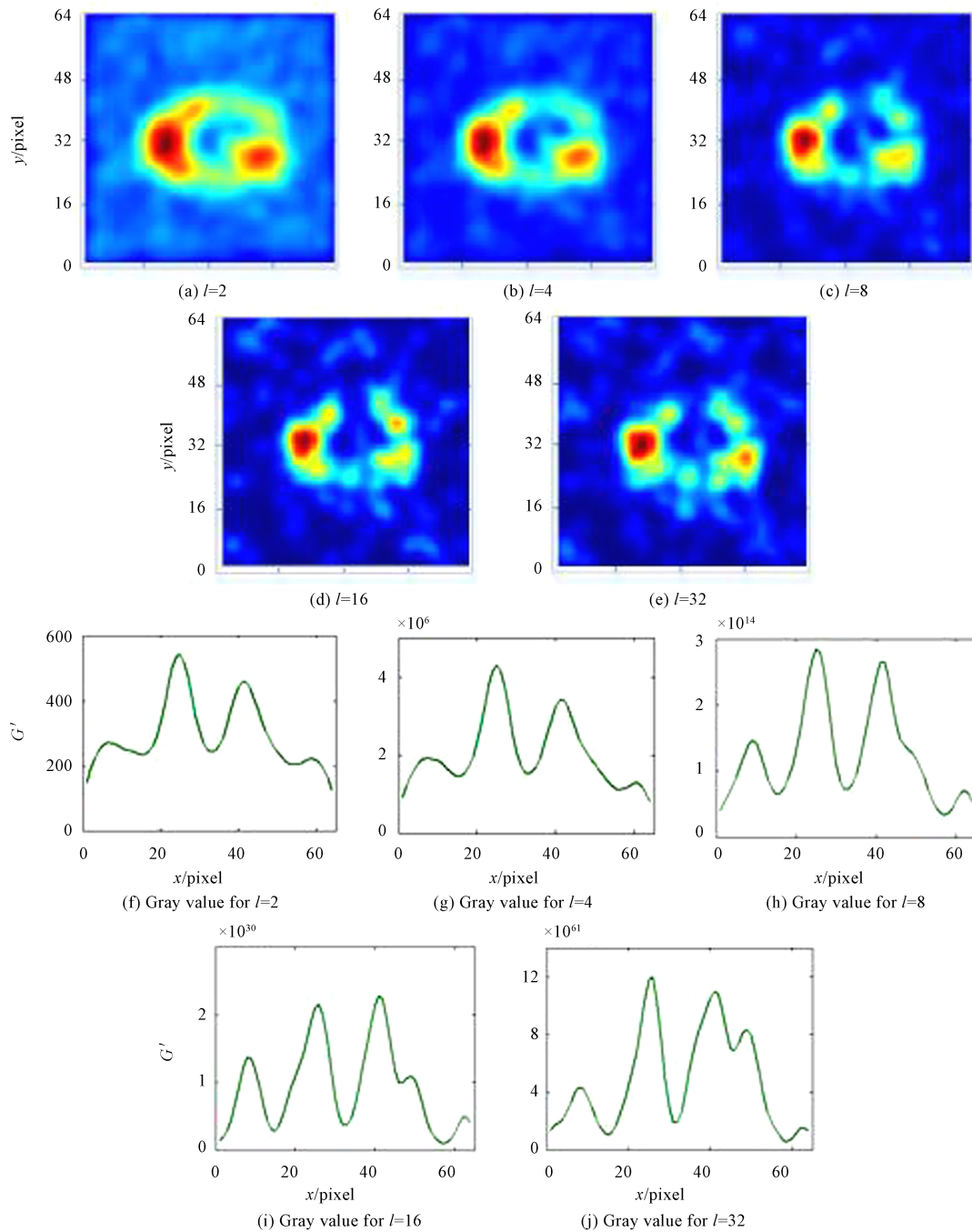


图7 不同组合长度下数值模拟结果
Fig.7 Numerical simulation results with different l

图7(f)~(j)为(a)~(e)鬼像中第31列像素转置后灰度值的分布图.由图中可以明显看出,在此范围内重构图像对比度与调制的步长呈正比关系,根据图7(e)~(h)计算可得对比度分别为0.37、0.42、0.58、0.70和0.71,整体呈现逐渐增加的趋势,且增加的幅度先增加又减小;图7(a)~(d)的峰值信噪比分别为11.873 9、13.356 7、13.784 4、13.480 6和13.436 2,整体呈现先增加后减小的趋势.特别地,当 l 为8、16和32时重构鬼像的结构已不再完整,多处连通区域出现断裂,且随着 l 的增大,断裂现象越加明显.

此外,为了说明不同尺寸下 l 的选取依据,利用上述方法分别对 30×30 、 128×128 等目标图像进行了组合-调制重构,结果发现当不同尺寸下散斑采样次数与尺寸大小比例相同时, l 的设置范围在2~8之间选取最优.

3.2 所提方法普适性分析

由于3.1中数值模拟是针对某个特定目标图像来进行的,并不能说明所提方法对其它目标图像重构的有效性.因此,为了进一步说明和验证方法的普适性和推广价值,本节以20幅不同的待重构目标图像为重构对象,利用TGI对多散斑图组合-调制前后的鬼像分别进行了重构,并计算得到了各重构结果所对应的峰值信噪比和对比度,如图8所示.

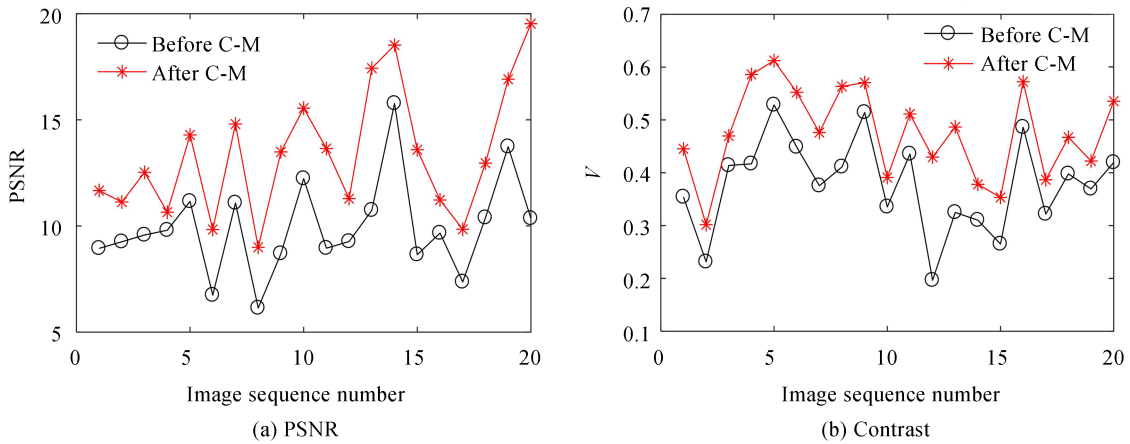


图8 多散斑图组合-调制前、后鬼像结果对比

Fig.8 Result comparing of ghost image before and after combination-modulation of multiple speckle patterns

对图8中结果进行对比发现,散斑图经过组合-调制后所得鬼像的峰值信噪比和对比度都得到了提升,提升幅度如图9所示.

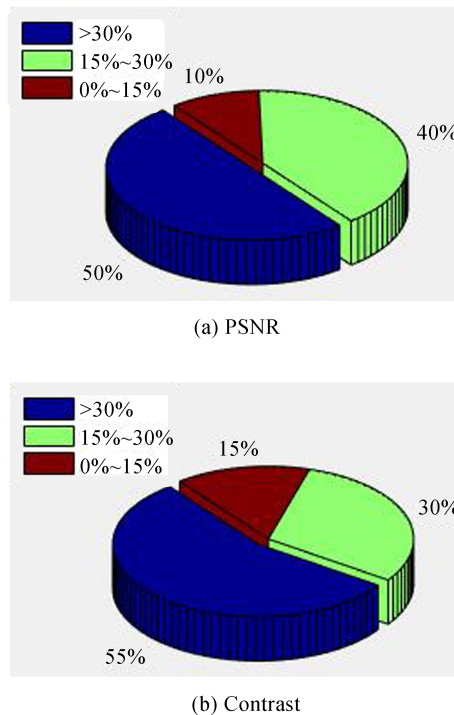


图9 峰值信噪比和对比度提升幅度示意图

Fig.9 Improvement degree schematic diagram of PSNR and contrast

由图8可知,利用本文方法对待重构目标图像集中的目标图像进行重构时,鬼像的峰值信噪比和对比度均有不同程度的提升,其中峰值信噪比和对比度均提升15%/30%以上的占比为85%/50%,且对比度的提升程度略高于峰值信噪比,提升程度在15%/30%以上的占比可达90%/55%.可见,该方法在提升重构目标

质量方面具有较好的普适性和推广价值.

4 结论

本文以增大随机散斑图间差异的方式,提出了一种可以有效提升鬼成像质量的优化方法.该方法利用小差异数据的组合-调制来达到提升数据间差异度的目的,能够有效提升成像质量.文中以未知目标图像“G”为重构对象,通过数值模拟,对组合程度为4时目标图像的鬼像进行了重构,并通过对散斑图未组合-调制前后结果的对比与分析,发现所提方法较 TGI、DGI 和基于 $\log_2(\cdot)$ 调制的 P-NGI 正像重构结果在峰值信噪比方面分别提高了 21.7%、8.3% 和 14.7%;在对比度方面分别提高了 27.3%、17.8% 和 25.7%.通过对不同组合长度下、不同尺寸目标图像重构,给出了组合长度的选取范围.利用 20 幅不同的待重构目标图像,对所提方法的普适性进行了分析,结果表明在峰值信噪比方面分别有 50% 和 90% 的待重构目标提升了 30% 和 15% 以上;在对比度方面分别有 55% 和 85% 的待重构目标提升了 30% 和 15% 以上,说明所提方法具有较高的普适性.此外,由于组合-调制后待关联数据量减少,在关联数据的后期存储和重构时间等方面也较未组合-调制前有所降低,这在一定程度上将有助于缓解鬼成像中数据量大的问题出现.因此,所提方法不仅可以有效提升鬼像质量,还将有利于推动鬼成像技术在实际中的应用.

参考文献

- [1] SHAPIOR J H. Computational ghost imaging[J]. *Physics Review Applied*, 2008, **78**(6): 061802.
- [2] LIU Qian, LUO Kai-hong, CHEN Xi-hao, *et al.* High-order ghost imaging with N-colour thermal light[J]. *Chinese Physics B*, 2010, **19**: 094211.
- [3] LIU Yi-xin. Application research of computational associated imaging[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
刘昱鑫. 计算式关联成像应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [4] DU Jin, GONG Wen-lin, HAN Sheng-sheng. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**: 1067-1069.
- [5] BAI Xu, LI Yong-qiang, ZHAO Sheng-mei. Differential compressive correlated imaging[J]. *Acta Physics Sinica*, 2013, **62**(4): 044209.
白旭, 李永强, 赵生妹. 基于压缩感知的差分关联成像方案研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(4): 044209
- [6] ZHONG Ya-jun, LIU Jiao, LIANG Wen-qiang, *et al.* Multiple speckle patterns differential compressive ghost imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(1): 014202.
仲亚军, 刘娇, 梁文强, 等. 针对多散斑图的差分压缩鬼成像方案研究[J]. 物理学报, 2015, **64**(1): 014202.
- [7] OLIVAS S J, RACHLIN Y, GU L, *et al.* Characterization of a compressive imaging system using laboratory and natural light scenes[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(19): 4515-4526.
- [8] YUE Jiang, HAN Jing, ZHANG Yi, *et al.* Denoising analysis of Hadamard transform spectrometry[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(13): 3744-3747.
- [9] ZHANG Wei-liang, ZHANG Wen-wen, HE Rui-qing, *et al.* Iterative denoising ghost imaging based on local Hadamard modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(4): 0411001.
张伟良, 张闻文, 何睿清, 等. 基于局部 Hadamard 调制的迭代去噪鬼成像[J]. 光学学报, 2016, **36**(4): 0411001.
- [10] AN Xiao-feng, LI Yan-qiu, MA Hai-yu, *et al.* Research on thresholding method of Hadamard coded modulation correlation imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(10): 1041002.
安晓峰, 李艳秋, 马海钰, 等. Hadamard 编码调制关联成像的阈值处理研究[J]. 红外与激光工程, 2018, **47**(10): 1041002.
- [11] MAHDI KHAMOUSHI S M, NOSRATI Y, TAVASSOLI S H. Sinusoidal ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(15): 3452-3455.
- [12] YAN Guo-qing, YANG Feng-bao, WANG Xiao-xia, *et al.* Fusion ghost imaging method based on frequency domain decomposition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(6): 0610003.
闫国庆, 杨风暴, 王肖霞, 等. 基于频域分解的融合鬼成像方法[J]. 光子学报, 2020, **49**(6): 0610003.
- [13] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, *et al.* Differential ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**: 219902.
- [14] LI Ming-fei, ZHANG Yu-ran, LUO Kai-hong, *et al.* Time-correspondence differential ghost imaging[J]. *Physical Review A*. 2013, **87**(3): 033813.
- [15] WEN Jian-ming. Forming positive-negative images using conditioned partial measurements from reference arm in ghost imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(9): 1906-1911.
- [16] YANG Huan, WU Shuang, WANG Hai-bo, *et al.* Probability theory in conditional-averaging ghost imaging with

- thermal light[J]. *Physical Review A*, 2018, **98**(5): 053853.
- [17] LI Gao-liang, ZHAO Yan, YANG Zhao-hua, *et al.* Positive-negative corresponding normalized ghost imaging based on an adaptive threshold[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, **13**(11): 115202.
- [18] DOU Ling-yu, XU De-qin, CAO De-zhong, *et al.* Demonstration of correlated imaging enhancement with divergence enlargement algorithms[J]. *Optics Communications*, 2019, **430**: 68-72.
- [19] LIU Hong-chao, YANG Huan, XIONG Jun, *et al.* Positive and negative ghost imaging[J]. *Physical Review Applied*, 2019, **12**(3): 034019.
- [20] DOI M, IWASAKI Y, SHIONOYA T, *et al.* High-resolution displacement measurement using mode interference in the optical waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(5): 651-653.