

# 切向运动目标的热光高阶鬼成像研究

梁振宇 樊祥 程正东 朱斌 施展

合肥电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 为了探讨光场的高阶关联对于切向运动目标鬼成像的影响,将热光高阶强度涨落鬼成像理论应用于切向运动目标鬼成像的研究中,并对所得结果进行了数值模拟和仿真实验,获得了相关仿真图像。结果表明,采用高阶强度涨落关联理论研究切向运动目标鬼成像,随着参考光束的阶数增加,光场的高阶关联将会极大地增加背景涨落的噪声,导致图像重建质量变差,而信号光束的阶数增加对成像质量影响较小,所以最低阶的鬼成像质量最好。

**关键词** 成像系统; 鬼成像; 高阶关联; 切向运动目标; 成像质量

中图分类号 O431.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.081102

## High-Order Thermo-Optic Ghost Imaging for a Tangential Moving Target

Liang Zhenyu Fan Xiang Cheng Zhengdong Zhu Bin Shi Zhan

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** In order to investigate the impact of light field high-order correlation on the tangential moving target ghost imaging, high-order background-subtracted ghost imaging theory can be applied. Some numerical simulations and experiments are carried out, and the relevant simulated images are obtained. In this study of tangential moving targets ghost imaging based on the high-order background-subtracted ghost imaging theory, the results show that the high-order correlation of the light field increases the background fluctuation noise when the reference beam order increases, and the quality of image reconstruction deteriorates. Moreover, the increase of the signal beam order has little effect on the image quality. So the best quality can be obtained by the lowest-order ghost imaging.

**Key words** imaging systems; ghost imaging; high-order correlation; tangential moving target; imaging quality

**OCIS codes** 110.3010; 110.2990; 270.0270; 100.2960

## 1 引言

鬼成像(ghost imaging)也称为关联成像(correlated imaging),是一种不同于传统成像方式的新型成像技术,也是量子成像领域的研究热点<sup>[1-7]</sup>。作为一种非局域成像,有关鬼成像的研究经历了从使用量子纠缠光源<sup>[1-2]</sup>产生“鬼像”到可以利用经典热光源<sup>[3-4]</sup>实现鬼成像的发展过程。由于获取简单,更利于实际应用,热光源已经成为了鬼成像领域中研究的重点之一。

经过近十年的发展,鬼成像的实用化研究已经迈出了重要的一步,中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生小组<sup>[8]</sup>研究的 GISC 雷达(ghost image via sparsity constraints, GISC Lidar)已经可以实现实际物体在千米级远处的成像,并且重建图像的质量已经取得极大的改善。但是,以往的许多研究主要针对静止目标,由于实际应用过程中目标和成像系统间大部分是运动的,所以研究运动目标的鬼成像性质具有重要的实践意义。

收稿日期: 2016-04-01; 收到修改稿日期: 2016-04-08; 网络出版日期: 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(61307025)、安徽省自然科学基金(1308085MF114)

作者简介: 梁振宇(1992—),男,硕士研究生,主要从事鬼成像算法与应用方面的研究。

E-mail: Liangzhenyueei@163.com

导师简介: 樊祥(1963—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事光电系统方面的研究。

E-mail: FanXiangLXL@163.com

在传统光学成像中,目标与成像系统间的相对运动将会导致成像质量急剧下降,而在鬼成像的研究中也从理论和实验得到了相似的结论<sup>[9]</sup>。有关运动目标的鬼成像研究主要分为两个方向:一是切向运动,二是轴向运动。对于前者,研究人员指出可以使用准静态估计<sup>[9]</sup>的方法将切向运动过程进行分段研究,即在满足一定条件下,每一段过程中目标相对于成像系统可看做是静止的,给出了切向运动目标鬼成像的研究思路。而对于后者,研究人员将轴向相关深度<sup>[10]</sup>的研究成果应用在轴向运动目标鬼成像研究中,给出了轴向运动目标的计算模型和实验验证<sup>[11]</sup>。同时,研究人员也提出了相应克服鬼成像运动模糊的方法:张聪等<sup>[12]</sup>提出基于参考光路 CCD 探测器记录的光场强度分布进行平移补偿进而提高运动目标鬼成像分辨率的方案,获取了运动目标的高分辨率鬼成像重建图像;Zhang 等<sup>[13]</sup>提出了一个不受目标运动影响的成像方案,即傅里叶变换鬼衍射,该方案可以很好地消除由于目标抖动而造成的运动模糊现象。

随着高阶鬼成像的提出,研究人员普遍认为,鬼成像的可见度随着阶数的增加而提高,成像阶数越大,成像效果越好<sup>[14-16]</sup>。然而,以往的切向运动目标鬼成像研究主要采用的是二阶鬼成像方案,但对多光场的高阶关联影响运动目标鬼成像的相关研究甚少。本文将高阶鬼成像方案运用于切向运动目标鬼成像性质研究中,推导了切向运动目标的高阶鬼成像计算模型,并利用计算机仿真了实验过程,从理论和仿真实验中分析了不同信号光束和参考光束的阶数对切向运动目标鬼成像质量的影响,以为研究切向运动目标鬼成像提供一种新的思路。

## 2 理想热光高阶强度涨落的切向运动目标鬼成像模型

传统的无透镜热光鬼成像系统由两路光路构成。激光束经旋转毛玻璃调制后,形成赝热光源,赝热光源经过一个非偏振性的分束棱镜(BS)后分成两束光:其中一束通过物体后,传播到一个无分辨率的桶探测器上,成为信号光路;另一束经过自由空间传播后到达一个具有分辨率的电荷耦合器件(CCD)探测器上,成为参考光路。当物体与桶探测器距离可忽略不计,且  $z = z_1$  时,对两个探测器探测到的光场强度进行关联,可得到物体的实空间像。对于切向运动目标的鬼成像研究主要采用如图 1 所示的实验原理图,研究目标是可以沿着信号光路进行切向(即图中显示的速度方向)运动的。

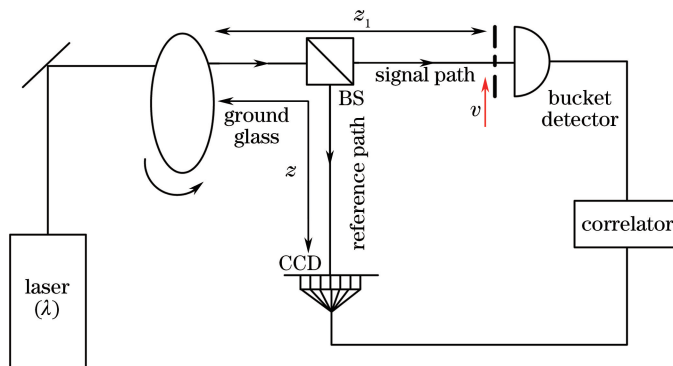


图 1 切向运动目标的二阶鬼成像实验原理图

Fig. 1 Schematic of the second ghost imaging for a tangential moving target

在图 1 的鬼成像系统中,两个探测器上的强度涨落应用的是信号光场和参考光场的二阶关联。参照光场二阶关联理论,很容易类推出光场的高阶关联理论,将高阶关联理论运用在鬼成像中就形成了高阶鬼成像。

理想的高阶鬼成像模型是假设参考光束和信号光束拥有完全一致的光强分布,可以用统一的表达式表示任意高阶鬼成像中的强度关联函数

$$G_{m,n,p}(\boldsymbol{\rho}) = \langle [S_o]^m [I_r(\boldsymbol{\rho})]^n \rangle, \quad (1)$$

式中  $m$  与  $n$  分别表示对应信号光束和参考光束的幂次阶数,  $S_o$  为桶探测器探测到的信号光路总强度,  $S_o = \sum_{k=1}^p I_o(\boldsymbol{\rho}_{in,k})$ , 因为选用的模拟目标是 1 个纯振幅二进制物体, 所以这里的  $p$  是物体透光部分所占的像素数,  $k$  是采样次数,  $I_r(\boldsymbol{\rho})$  表示参考光路位于  $\boldsymbol{\rho}$  位置处的光场强度。

根据热光场的二阶关联函数,鬼成像结果中包含 1 个均值非零的背景项,该背景项为统计噪声,如果不

消除背景项,则会降低鬼成像的成像质量。对于最低阶的鬼成像(二阶关联),采用消除背景项的关联函数为

$$G'_{1,1,p}(\boldsymbol{\rho}) = \langle [S_o] [I_r(\boldsymbol{\rho})] \rangle - \langle [S_o] \rangle \langle [I_r(\boldsymbol{\rho})] \rangle = \langle [\Delta S_o] \rangle \langle [\Delta I_r(\boldsymbol{\rho})] \rangle, \quad (2)$$

式中  $\Delta S_o = S_o - \langle S_o \rangle$ ,  $\Delta I_r(\boldsymbol{\rho}) = I_r(\boldsymbol{\rho}) - \langle I_r(\boldsymbol{\rho}) \rangle$ , 分别对应的是信号光和参考光的强度涨落。因此,采用这种消除背景项的方法实现的鬼成像是强度涨落鬼成像。参考(2)式,能够得到高阶强度涨落鬼成像(BSGI, high-order background-subtracted ghost imaging)函数,成像的关联函数为

$$G'_{m,n,p}(\boldsymbol{\rho}) = \langle [S_o]^m [I_r(\boldsymbol{\rho})]^n \rangle - \langle [S_o]^m \rangle \langle [I_r(\boldsymbol{\rho})]^n \rangle. \quad (3)$$

借鉴传统二阶鬼成像切向运动目标的推导过程<sup>[9]</sup>,在第  $i$  次探测时,设信号光路中物平面的散斑场强度分布为  $I_s(\boldsymbol{\rho}, i)$ , 目标静止状态下的透射函数为  $O(\boldsymbol{\rho})$ , 则在总探测次数为  $N$  次,在不考虑桶探测器探测效率以及噪声情况下,第  $i$  次探测时获取的总光强为  $S(i)$ , 则可得

$$S(i) = \int I_s(\boldsymbol{\rho}, i) O(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\rho}, \quad (4)$$

式中  $O(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\xi})$  指假设目标物体以速度  $v$  进行匀速运动,则经过时间  $\tau$  后成像目标中心偏移量  $\boldsymbol{\xi} = v\tau$ 。而第  $i$  次探测时的参考光束光强为  $I_r(\boldsymbol{\rho}, i)$ , 则可推得  $[S_o] = \int S(i) di$ ,  $[I_r(\boldsymbol{\rho})] = \int I_r(\boldsymbol{\rho}, i) di$ , 将  $[S_o]$ 、 $[I_r(\boldsymbol{\rho})]$  代入(3)式中即可求得任意阶数的切向运动目标的高阶强度涨落关联函数  $G'_{m,n,p}(\boldsymbol{\rho})$ 。

### 3 数值模拟与分析

为了验证以上的理论推导,进行了数值模拟和计算机仿真实验。设置光源波长为  $\lambda = 632.8$  nm, 光源的横向尺寸为  $D = 3$  mm, 光源平面到 CCD 探测平面的距离  $z = 600$  mm, 使用的模拟目标为纯振幅透射双缝, 如图 2(a) 所示, 目标大小为  $30 \text{ pixel} \times 80 \text{ pixel}$ , 透光区域为  $30 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 。1) 设置  $m = 1, n = 1$  时的静止目标鬼成像重建图像作为对比, 如图 2(b) 所示; 2) 设定目标沿信号光路切向做匀速运动, 速度为  $v = 0.002 \text{ pixel/Sa}$ , 它的含义为每完成 500 次采样, 目标运动 1 个像素, 采样次数为 5000; 3) 仿真了阶数  $m$  和  $n$  分别为 1、2、4 的情况下切向运动目标的鬼成像  $G'_{m,n}$  重建结果, 如图 3 所示。

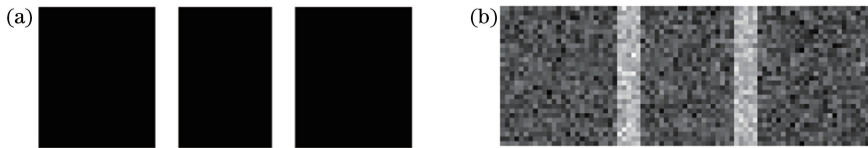


图 2 仿真结果。(a) 原目标; (b)  $m = 1, n = 1$  时静止目标鬼成像重建图像

Fig. 2 Simulation results. (a) Original target; (b) static target ghost reconstruction imaging result when the correlated order  $m = 1, n = 1$

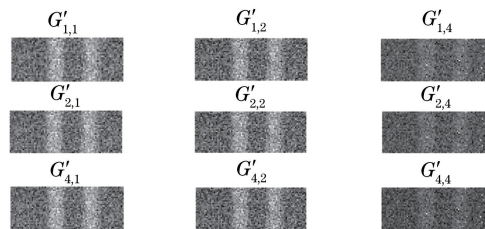


图 3 不同阶数切向运动目标鬼成像仿真结果

Fig. 3 Simulation results of different orders ghost imaging for a tangential moving target

为了定量评价鬼成像图像的质量,常常采用计算鬼像  $\hat{T}$  和待测物体的原始像  $T$  的均方误差 ( $E_{MS}$ ) 和峰值信噪比 ( $R_{PSN}$ ) 来衡量, 其定义为

$$E_{MS} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\hat{T}(i, j) - T(i, j)]^2, \quad (5)$$

$$R_{PSN} = 10 \times \lg \left( \frac{T_{\max}^2}{E_{MS}} \right), \quad (6)$$

式中  $T_{\max}$  表示原图像所有像素点中的强度最大值。由(5)、(6)式易知,  $E_{MS}$  值越小,  $R_{PSN}$  越高, 图像重建质

量越高。图 4(a)是重建图像  $R_{\text{PSN}}$  随信号光束的幂次阶数  $n$  变化的曲线;图 4(b)是重建图像  $R_{\text{PSN}}$  随参考光束的幂次阶数  $m$  变化的曲线,取前 1500 次测量结果。由于实验中每次测量的赝热光场是随机的,所以图 4(a)、(b)所示的结果可能存在随机误差,但总体趋势不受影响。

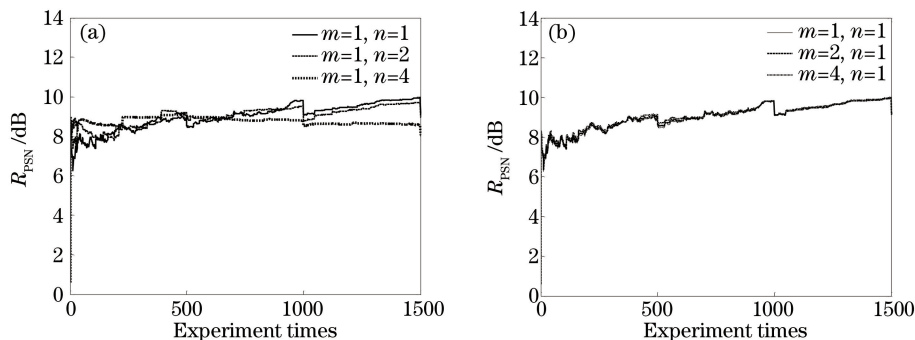


图 4 重建图像的  $R_{\text{PSN}}$  曲线。(a)  $R_{\text{PSN}}$  随阶数  $n$  变化曲线; (b)  $R_{\text{PSN}}$  随阶数  $m$  变化曲线

Fig. 4  $R_{\text{PSN}}$  curves of the reconstructed image. (a)  $R_{\text{PSN}}$  curves with correlated order  $n$ ; (b)  $R_{\text{PSN}}$  curves with correlated order  $m$

结合图 2、图 3 可知,在参考 CCD 探测器上得到的是目标运动的拖影,显然,目标的运动导致鬼成像质量严重下降。由图 3、图 4 可知,当信号光束的幂次阶数  $m$  不变而参考光束的幂次阶数  $n$  增加时,目标鬼成像的成像质量出现了明显差别。而当参考光束的幂次阶数  $n$  不变而信号光束的幂次阶数  $m$  增加时,目标鬼成像的成像质量并没有明显差别;由此可得出,参考光束的幂次阶数  $n$  增加会使目标成像质量大幅下降。

综上所述,可以发现,切向运动目标的鬼成像在阶数为  $m=1, n=1$  所得的图像质量最好,这是因为鬼成像是基于统计平均计算出来的图像,增加信号光束的阶数对应增加了鬼成像的信号项,而增加参考光束的阶数对应增加了鬼成像的背景项,所以当参考光束的阶数增加时,背景噪声将会被极大地增加,导致图像信号完全淹没在背景涨落的噪声中,而且目标物体运动时鬼成像过程中的采样不足,也极大地增加了噪声。该结果与文献[14-16]所得的结果并不相同,这是因为本研究所采用的高阶关联是消除背景项的 BSGI 方式,而文献[14-16]中所采用的高阶关联并没有消除背景项,所以会得到增加关联阶数将会提高鬼成像质量的结论。本研究所采用的 BSGI 研究方法,可以消除一些随机因素,得到更佳的成像效果。

## 4 结 论

利用光场的高阶关联理论研究了目标切向运动目标鬼成像,对切向运动目标鬼成像图像质量进行了数值模拟和仿真实验。结果表明,随着信号光束幂次阶数的增加,切向运动目标鬼成像重建质量差距不大;而当参考光束幂次阶数增加时,光场的高阶关联将会极大地增加背景涨落的噪声,导致鬼成像重建质量变差,此时最低阶的鬼成像得到的成像质量最好。对于切向运动目标鬼成像研究来说,最低阶鬼成像更适用于实际情况。

## 参 考 文 献

- 1 Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Physical Review A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- 2 Abouraddy A F, Saleh B E, Sergienko A V, *et al.* Role of the entanglement in two-photon imaging[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(12): 171-178.
- 3 Bennink R S, Benley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 3601-3605.
- 4 Bennink R S, Benley S J, Boyd R W. Quantum and classical coincidence imaging[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(3): 3601-3605.
- 5 Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 3903-3907.

- 6 Gatti A, Brambilla E, Bache M, *et al.* Correlated imaging, quantum and classical[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(1): 3606-3612.
- 7 Ferri F, Magatti D, Gatti A, *et al.* High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- 8 Han Shensheng, Gong Wenlin, Chen Mingliang, *et al.* Research progress of GISC lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2547-2555.  
韩申生, 龚文林, 陈明亮, 等. 基于稀疏和冗余表象的鬼成像雷达研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2547-2555.
- 9 Li H, Xiong J, Zeng G. Lensless ghost imaging for moving objects[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 895-900.
- 10 Gong W L, Han S S. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(4): 675-678.
- 11 Li X H, Deng C J, Chen M L, *et al.* Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- 12 Zhang Cong, Gong Wenlin, Han Shensheng, *et al.* Ghost Imaging for moving targets and its application in remote sensing [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1214003.  
张 聪, 龚文林, 韩申生, 等. 运动目标强度关联成像及在遥感探测中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214003.
- 13 Zhang C, Gong W L, Han S S. Improving imaging resolution of shaking targets by Fourier-transform ghost diffraction [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(2): 021111.
- 14 Liu Q, Chen X H, Luo K H, *et al.* Role of multiphoton bunching in high-order ghost imaging with thermal light sources [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053844.
- 15 Cao D Z, Xiong J, Zhang S H, *et al.* Enhancing visibility and resolution in  $N$ th-order intensity correlation of thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(20): 201102.
- 16 Chen X H, Agafonov I N, Luo K H, *et al.* High-visibility, high-order lensless ghost imaging with thermal light[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(8): 1166-1168.