

任意阶运动目标强度关联成像

梁振宇, 樊 祥, 程正东, 朱 斌, 陈 熠

(电子工程学院 脉冲功率技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 开展了强度关联阶数对于运动目标关联成像影响的研究, 通过改变信号光束和参考光束的阶数, 分别讨论了切向和轴向运动目标在不同强度关联阶数下的关联成像质量。在运动目标关联成像系统原理光路的基础上, 从理论上重点分析了不同强度关联阶数对关联成像计算模型的影响, 并且利用计算机进行了仿真实验。结果表明: 强度关联阶数的改变不能消除运动模糊, 增加信号光束的阶数可以改善关联成像质量, 但是在去除背景项的情况下, 反而是最低阶的关联成像质量最好, 并且轴向运动目标的关联成像质量下降地更为严重。

关键词: 关联成像; 强度关联阶数; 运动目标; 成像质量

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0824002

*N*th-order intensity correlated imaging for moving target

Liang Zhenyu, Fan Xiang, Cheng Zhengdong, Zhu Bin, Chen Yi

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

Abstract: The influence of intensity correlation order on correlated imaging for moving target was researched. The image quality of correlated imaging for tangential and axial moving target in different intensity correlation order was discussed by changing the signal light order and the reference light order. Based on the schematic of *N*th-order lensless correlated imaging for moving target, analysis of the influence of different intensity correlation order was performed with emphasis on the correlated imaging mathematic model, and the simulation experiments were performed. The results suggest that it can not effectively eliminate the motion blur by changing the intensity correlation order, and the image quality will be better with the increase of signal light order. However, the best quality can be obtained by the lowest-order with background subtraction, and the image quality of axial moving target will decrease more serious.

Key words: correlated imaging; intensity correlation order; moving target; image quality

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-01-13

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, 硕士生, 主要从事关联成像算法方面的研究。Email: Liangzhenyueei@163.com

导师简介: 樊祥(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电系统方面的研究。Email: FanXiangLXL@163.com

0 引言

强度关联成像,也称为关联成像(Correlated Imaging)、鬼成像(Ghost Imaging),是一种通过计算信号光场和参考光场的强度关联函数来进行成像的技术。作为一种非局域成像方法,在理论诞生之初就引起了广泛的关注和研究^[1-3]。近年来,关联成像在实用化道路上取得了很大的进展^[4-7],如利用关联成像技术的 GISC 雷达^[8](Ghost Image via Sparsity Constraints, GISC Lidar)已经可以成像距离在千米量级远处的实际物体,并且取得了较好的成像质量。但是对于一个可以实际应用的关联成像系统,很多时候不可避免的存在目标与成像系统存在相对运动的情况,所以,相比于静止目标,运动目标的关联成像研究在实践中更有意义。

对于运动目标的关联成像研究,现在的研究还主要集中在理论推导和算法验证上,目标在信号光路上的运动为低速匀速直线运动,分为切向和轴向两个运动方向,对于前者,研究人员指出可以使用准静态估计^[8]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关联成像的研究思路。对于后者,研究人员将轴向相关深度^[9]的研究结论应用在轴向运动目标关联成像研究中,给出了轴向运动目标的计算模型和实验验证^[10]。同时,研究人员也提出了相应克服关联成像运动模糊的方法:在参考文献[11]中,研究人员提出基于参考光路 CCD 探测器记录的光场强度分布平移补偿进而提高运动目标关联成像分辨率的方案,获取了运动目标的高分辨率关联成像重建图像^[11]。在参考文献[12]中,他们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可以很好地消除目标抖动造成的运动模糊^[12]。

随着研究人员对关联成像物理本质研究的推进,人们发现经典关联成像其实是利用了信号光场和参考光场之间不同时空点的光场强度的关联,即二阶强度关联。参照二阶关联函数,研究人员类推出高阶关联函数,并将之应用到关联成像中形成了高阶关联成像,发现增加强度关联阶数可以改善关联重建图像的质量^[13-15]。为了研究不同强度关联阶数

对运动目标关联成像的影响,文章分别对切向和轴向运动目标在不同强度关联阶数情况下进行了理论分析和仿真实验,分析了在不同强度关联阶数对切向和轴向运动目标关联成像的影响与原因,为运动目标关联成像研究提供了一种新思路。

1 成像模型与理论分析

1.1 运动目标强度关联成像模型

图 1 为运动目标的任意阶无透镜关联成像光路原理图。激光束经旋转毛玻璃调制后产生赝热光源,经过非偏振性的分束棱镜组分成 $N(N=2, 3, 4, \dots)$ 个独立的光路。其中 $m(m=1, 2, \dots)$ 路为信号光路,光束通过物体由 m 个桶探测器接收透射后的光场信息;另外 $n(n=1, 2, \dots)$ 路为参考光路,不经过物体,由 n 个具有空间分辨率的 CCD 探测器直接接收光场信息。物体可沿着信号光路切向或者轴向做匀速直线运动,其速度为 v 。物体与桶探测器距离可忽略不计,将这 N 路探测器的探测数据进行关联计算,可以得到任意阶运动目标关联重建图像。

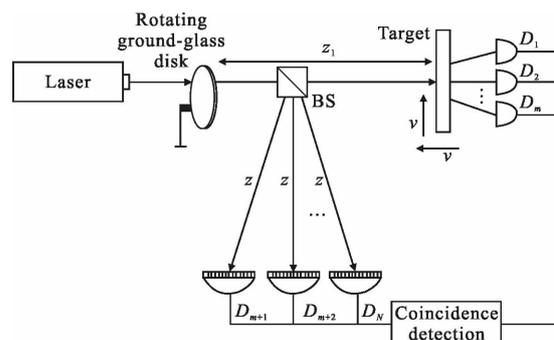


图 1 任意阶运动目标无透镜关联成像光路原理图

Fig.1 Schematic of Mth-order lensless correlated imaging for moving target

1.2 任意阶运动目标强度关联成像理论

根据强度关联成像理论,所有的信号光路探测器处的光场和所有参考光路的光场之间的关联函数为:

$$G^{(N)}(x_1, \dots, x_N) = \langle I_1(x_1) \cdots I_N(x_N) \rangle \quad (1)$$

式中: $\langle \dots \rangle$ 表示系综平均; $I_i(x_i)$ 表示各个探测器之间的光场强度。在理想关联光学成像中,由于所有光束都具备完全相同的光场强度分布,所以对于这 N 束光在各个探测器平面产生的光场瞬时强度可以认为是相等的,因此任意阶的强度关联函数可等效为:

$$G^{(n)}(y_r, y_t) = \langle I_t^m(y_t) I_r^n(y_r) \rangle \quad (2)$$

去除背景项的强度关联函数(也称为强度涨落关联函数)为:

$$\Delta G^{(n)}(y_r, y_t) = \langle I_t^m(y_t) I_r^n(y_r) \rangle - \langle I_t^m(y_t) \rangle \langle I_r^n(y_r) \rangle \quad (3)$$

式中, $I_1(x_1) = I_2(x_2) = \dots = I_m(x_m) = I_t(y_t)$, $I_{m+1}(x_{m+1}) = I_{m+2}(x_{m+2}) = \dots = I_{m+n}(x_{m+n}) = I_r(y_r)$, y_t 和 y_r 代表桶探测器平面和参考探测平面的坐标变量, m 和 n 分别代表信号光束的阶数和参考光束的阶数。

对于一个实际的关联成像系统, 由于在探测过程中, 目标与成像系统之间产生相对运动, 因此不能采用之前静止目标的关联成像理论进行分析。研究人员指出, 对于运动目标关联成像的研究可以通过准静态估计的方法, 其涵义为, 在一段探测时间内, 若目标的位移小于光场的横向相关距离, 则对于关联成像系统来说, 就可以将物体和成像系统等效为相互静止的, 从而将目标的运动轨迹分解。设在第 i 次探测时, 光场自由传播距离为 z 后的 CCD 探测器上的光场复振幅分布为:

$$E_t(y_r, i) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int E_0(y_0) \times \exp[jk(y_r - y_0)/2z] dy_0 \quad (4)$$

式中: $E_0(y_0)$ 为毛玻璃面处的复振幅分布。同样, 光场透过物体传播距离为 z_1 后桶探测器表面处的光场复振幅分布为:

$$E_t(y_t, i) = \frac{\exp(jkz_1)}{j\lambda z_1} \int E_0(y_0) t(y_t) \times \exp[jk(y_t - y_0)/2z_1] dy_0 \quad (5)$$

式中: $t(y_t)$ 为目标的透射函数。

对于切向运动目标, 其桶探测器表面处的光场复振幅分布为:

$$E_t(y_t, i) = \frac{\exp(jkz_1)}{j\lambda z_1} \int E_0(y_0) t(y_t - \xi) \times \exp[jk(y_t - y_0)/2z_1] dy_0 \quad (6)$$

式中: $\xi = v_t t$ 为目标中心偏移量; v_t 为目标切向运动速度。显然由于目标的切向运动导致了成像目标中心偏移, 这种情况下所得的重建图像是目标透射函数的一个拖影, 造成了运动模糊。

而对于轴向运动目标, 其桶探测器表面处的光场复振幅分布为:

$$E_t(y_t, i) = \frac{\exp[jkz_1(t)]}{j\lambda z_1(t)} \int E_0(y_0) t(y_t) \times \exp[jk(y_t - y_0)/2z_1(t)] dy_0 \quad (7)$$

式中: $z_1(t) = z - v_a t$, v_a 为目标轴向运动速度。与切向运

动不同, 目标沿轴向的运动已经不满足实空间关联成像的成像条件: $z = z_1$, 但是人们研究发现, 在满足光场的轴向相关深度 $\Delta z = |z - z_1(t)| < 6.7\lambda(z/D)^2$ 条件下, 也可以得到轴向运动目标的关联重建图像, 但是这也导致关联重建图像质量严重下降。

根据所得的光场复振幅, 定义在桶探测平面和 CCD 探测平面的瞬时光强为 $I_{ki}(y_k) = E_{ki}^*(y_k) E_{ki}(y_k)$; $k = r, t$; $i = 1, 2, \dots$; 下标 i 表示该瞬时光强是第 i 次测量的独立样本, 设测量样本数 N , 则为可得两臂的平均光场强度分布为:

$$\langle I_{ki}(y_k) \rangle = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E_{ki}^*(y_k) E_{ki}(y_k), k = r, t; i = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

将公式(8)带入公式(2)和公式(3)中即可求得任意阶数的运动目标强度关联函数为:

$$G^{(n)}(y_r, y_t) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K I_{ri}^m(y_r) I_{ti}^n(y_t) \quad (9)$$

去除背景项的强度涨落关联函数为:

$$\Delta G^{(n)}(y_r, y_t) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K I_{ri}^m(y_r) I_{ti}^n(y_t) - \frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K I_{ri}^m(y_r) \sum_{i=1}^K I_{ti}^n(y_t) \quad (10)$$

1.3 强度关联阶数改变对关联成像的影响分析

从目前的实际应用来看, 强度关联成像的成像质量还不够理想, 人们普遍认为提高强度关联阶数将同样会使关联重建图像质量得到改善, 对此, 根据关联成像的计算模型对不同强度关联阶数对运动目标关联成像进行了分析。

首先, 以二阶强度关联函数为例:

$$G^{(2)}(y_r, y_t) = \langle E_r^*(y_r') E_r(y_r') E_t(y_t) E_t(y_t) \rangle = \langle I_r(y_r) \rangle \langle I_t(y_t) \rangle + \langle \Delta I_r(y_r) \Delta I_t(y_t) \rangle \quad (11)$$

式中: 对成像具有决定性影响的项 $\langle \Delta I_r(y_r) \Delta I_t(y_t) \rangle$ 可作为信号项, 而 $\langle I_r(y_r) \rangle \langle I_t(y_t) \rangle$ 可看做背景项, 在考虑系统其他误差的情况下, 二阶强度关联函数可用下式表示:

$$G^{(2)} = G_{\text{signal}} + G_{\text{background}} + G_{\text{noise}} \quad (12)$$

由于背景项均值非零, 该背景项的存在对成像质量影响巨大, 理论上二阶关联成像可见度只能达到 1/3, 当在算法中去除了背景项之后, 成像质量将会有较大改善。

而对于强度关联阶数大于 2 的情况, 关联函数也将会发生变化。这里以强度关联阶数为 $N=3(m=1, n=2)$ 时的关联函数为例, 如公式(13)为三阶关联函数表达式为:

$$\begin{aligned}
 G^{(3)}(y_{r1}, y_{r2}, y_t) = & \langle E_r^*(y_t') E_{r1}^*(y_{r1}') E_{r2}^*(y_{r2}') E_{r2}(y_{r2}) \\
 E_{r1}(y_{r1}) E_t(y_t) \rangle = & \langle I_{r1}(y_{r1}) \rangle \langle I_{r2}(y_{r2}) \rangle \langle I_t(y_t) \rangle + \langle I_{r1}(y_{r1}) \rangle \\
 & \langle \Delta I_{r2}(y_{r2}) \Delta I_t(y_t) \rangle + \langle I_{r2}(y_{r2}) \rangle \langle \Delta I_{r1}(y_{r2}) \Delta I_t(y_t) \rangle + \\
 & \langle I_t(y_t) \rangle \langle \Delta I_{r1}(y_{r2}) \Delta I_{r2}(y_{r2}) \rangle + \langle \Delta I_{r1}(y_{r2}) \Delta I_{r1}(y_{r2}) \Delta I_{r2}(y_{r2}) \rangle + \\
 & \langle \Delta I_{r1}^*(y_{r2}) \Delta I_{r1}^*(y_{r2}) \Delta I_{r2}^*(y_{r2}) \rangle \quad (13)
 \end{aligned}$$

从式 13 中可以看到，三阶关联函数的项数增加为五项，第一项为三个探测器处光场强度系综平均的乘积，可看做背景项；第二项是第一个探测器光场强度系综平均和第二、第三个探测器处的光场强度涨落起伏的乘积，由于只有信号探测器前放置了物体，所以第二项也可视为背景项；第三项是第二个探测器光场探测器光场强度系综平均和第一、第三个探测器处的光场强度涨落起伏的乘积，可看做对成像有贡献的项，同样，第四项也是对成像有作用的项。

可以看到三阶关联函数相比二阶关联函数的信号项和背景项变得更多，若是去除了背景项的影响，所得的关联函数为：

$$\begin{aligned}
 \Delta G^{(3)}(y_{r1}, y_{r2}, y_t) = & \langle I_{r1}(y_{r1}) I_{r2}(y_{r2}) I_t(y_t) \rangle - \\
 & \langle I_{r1}(y_{r1}) \rangle \langle I_{r2}(y_{r2}) \rangle \langle I_t(y_t) \rangle \quad (14)
 \end{aligned}$$

可以看到，三阶涨落关联函数仅仅去除三个探测器处的光场强度系综平均的乘积这一个背景项，相比较未去除背景项的三阶关联成像，其成像质量有所提高，但是在关联函数中还包含对成像质量有影响的背景项，会降低最终成像质量。同样，若采用更高阶的关联成像方式，关联函数的背景项就越多，再加上统计迭代计算所产生的噪声，去除背景项的高阶关联成像反而质量不如二阶关联成像的质量。所以总的来说，对于更高阶数的强度关联函数，若是增加信号光路的探测器数量即信号光束阶数增加时，对于关联函数即相当于增加信号项，而增加参考光路的探测器数量即参考光束阶数增加时，对于关联函数即相当于增加了背景项，所以对于未去除背景项的关联函数，增加信号探测器将会提高关联成像质量了，而增加 CCD 探测器会降低关联成像质量。而对于去除了背景项的关联函数，情况却并不完全相同，反而是最低阶的关联成像质量最好。

2 仿真实验与分析

为了研究不同强度关联阶数对切向和轴向运动目标关联成像的影响，进行了计算机仿真实验。设置光源波长为 $\lambda=632.8\text{nm}$ ，光源的横向尺寸为 $D=3\text{mm}$ ，光源平面到参考探测平面的距离 $z=600\text{mm}$ ，使用

的模拟目标为纯振幅简单透射双缝，大小为 $30\text{pixel} \times 80\text{pixel}$ ，透光区域为 $30\text{pixel} \times 5\text{pixel}$ 。作为对比，首先仿真了切向和轴向运动目标的二阶关联成像和二阶涨落关联成像结果，如图 2 所示。

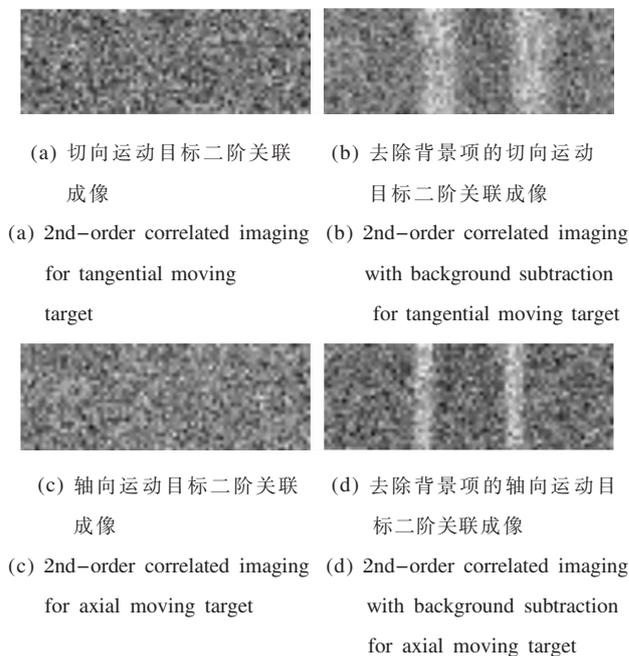


图 2 仿真结果

Fig.2 Simulation results

2.1 切向运动目标的关联成像仿真结果

设定目标沿信号光路切向做匀速运动，速度为 $v=0.002\text{pixel/sampling}$ ，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 5 000。仿真了参考光束阶数 $n=1$ ，信号光束阶数 $m=10、20、30、40$ 情况下切向运动目标关联重建图像结果，如图 3 所示。

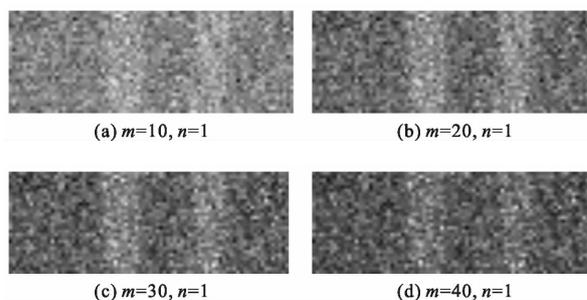


图 3 不同信号光束阶数切向运动目标关联成像仿真结果

Fig.3 Simulation results of different signal orders correlated imaging for tangential moving target

同时，还仿真了信号光束阶数 $m=30$ ，参考光束阶数分别为 $n=1、2、3、5$ 时的关联重建图像，如图 4 所示。

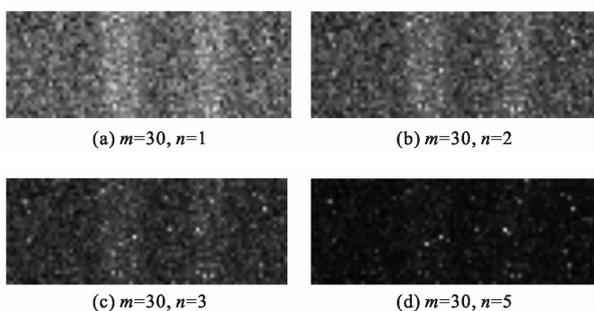


图 4 不同参考光束阶数切向运动目标关联成像仿真结果
Fig.4 Simulation results of different reference order correlated imaging for tangential moving target

按照上一节对去背景项的关联成像研究结果,在相同情况下,去除背景项的关联重建图像质量将会比未去除背景项的传统关联重建图像质量有较大的提高,对此,同样仿真了去除背景项之后的切向运动目标在参考光束阶数 $n=1$,信号光束阶数 $m=10、20、30、40$,以及信号光束阶数 $m=30$,参考光束阶数分别为 $n=1、2、3、5$ 时的关联重建图像,如图 5 和图 6 所示。

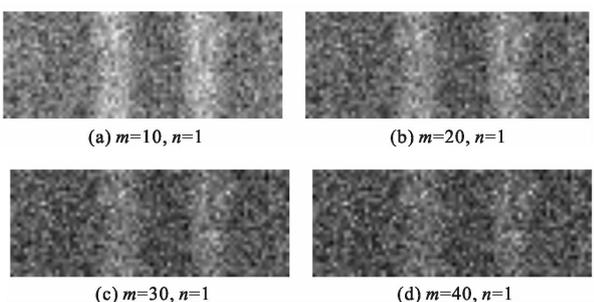


图 5 去除背景项后不同信号光束阶数切向运动目标关联成像仿真结果
Fig.5 Simulation results of different signal order correlated imaging with background subtraction for tangential moving target

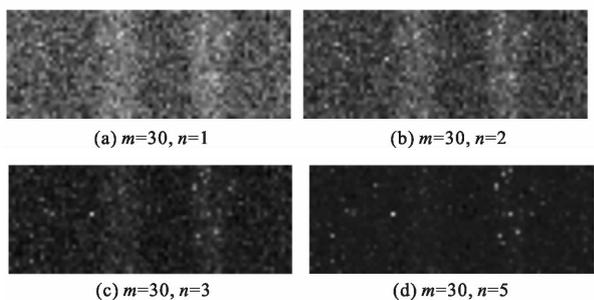


图 6 去除背景项后不同参考光束阶数切向运动目标关联成像仿真结果
Fig.6 Simulation results of different reference order correlated imaging with background subtraction for tangential moving target

2.2 轴向运动目标的关联成像仿真结果

接着,用同样的方法对轴向运动目标进行了计算机仿真实验,设置目标沿轴向运动速度为 $v=0.004 \text{ pixel/sampling}$,它的含义为每完成 25 次采样,目标运动 1 mm,采样次数为 2 500。根据上节理论推导关于光场轴向相关深度的定义,可以计算出设置的仿真实验光场的轴向相关深度 $\Delta z < 6.7\lambda(z/D)^2 \approx 170 \text{ mm}$,经过 2 500 次采样,目标将会沿信号光路轴向匀速运动 100 mm,符合关联成像的光路要求。同样,仿真了轴向运动目标在在参考光束阶数 $n=1$,信号光束阶数 $m=10、20、30、40$,以及信号光束阶数 $m=30$,参考光束阶数分别为 $m=1、2、3、5$ 时的未去除背景项和去除背景项的关联重建图像,仿真结果如图 7~10 所示。

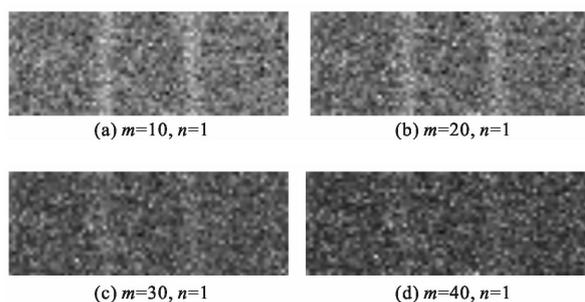


图 7 不同信号光束阶数轴向运动目标关联成像仿真结果
Fig.7 Simulation results of different signal order correlated imaging for axial moving target

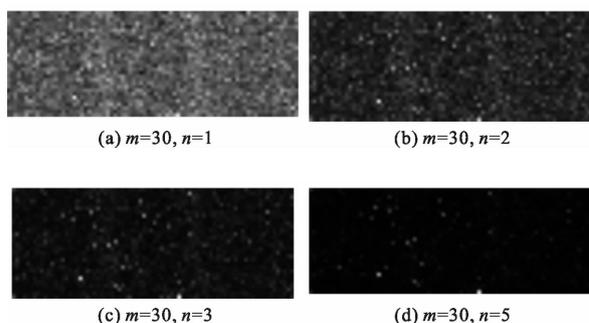
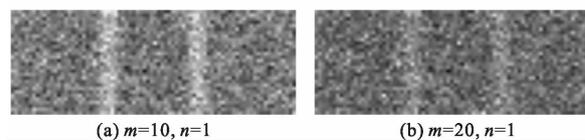


图 8 不同参考光束阶数轴向运动目标关联成像仿真结果
Fig.8 Simulation results of different reference order correlated imaging for axial moving target



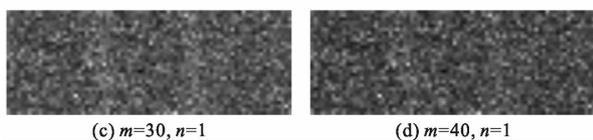


图 9 去除背景项后不同信号光束阶数轴向运动目标关联成像仿真结果
Fig.9 Simulation results of different signal order correlated imaging with background subtraction for axial moving target

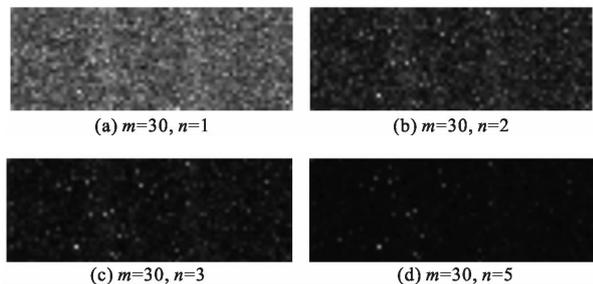


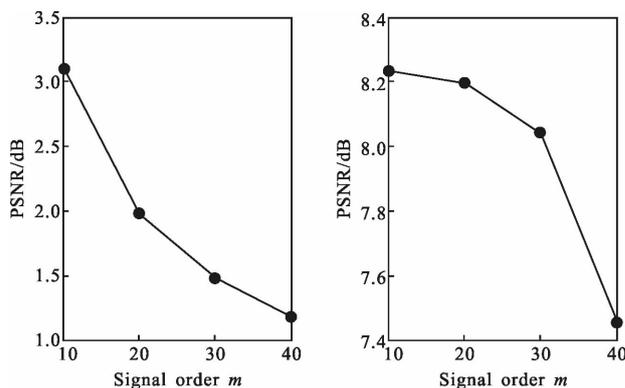
图 10 去除背景项后不同参考光束阶数轴向运动目标关联成像仿真结果
Fig.10 Simulation results of different reference order correlated imaging with background subtraction for axial moving target

2.3 仿真结果分析

结合图 2~6 可以看出，目标的运动导致了关联成像质量严重下降，比较不同阶数切向运动目标和轴向运动目标的关联成像结果，可以发现，采用高于二阶的强度关联阶数在相同测量次数下，几乎无法成像，而随着信号阶数增加时，关联成像质量会比二阶关联成像的质量好，但是，也可以看到当信号阶数增加到一定的数量时，关联成像质量又出现了下降，所以，在未去除背景的运动目标关联成像中存在一个成像的最佳强度阶数，需要结合运动目标的特性找出这一关联成像阶数，这对实际应用中信号探测器的设置有较大的参考价值。同时，比较去除背景的不同阶数关联成像结果，可以发现，参考光束阶数的增加对成像没有好处，而随着信号阶数的增加，关联成像的质量并不是逐渐变好，并且对于切向和轴向运动目标的影响也不尽相同，对此，使用了峰值信噪比 (PSNR) 这一质量评价手段对切向和轴向运动目标的关联重建图像质量进行了定量评价，如图 11 和图 12 所示。

仔细观察图 11 和图 12，可以看到，随着信号光束阶数的增加，无论是否去除了背景项，相比于切向运动目标，轴向运动目标的关联重建图像的峰值信

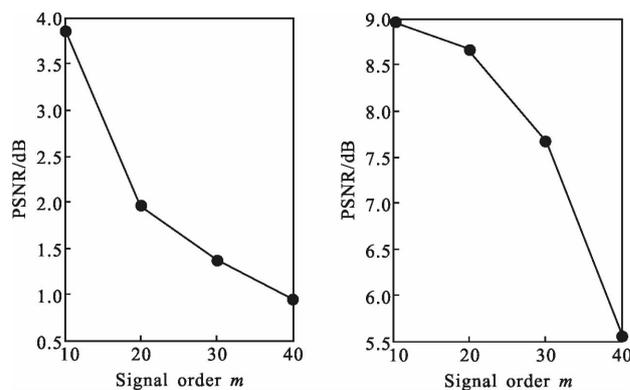
噪比下降的更为厉害，体现在成像效果上，在信号光束阶数超过 20，轴向运动目标的重建图像基本不可分辨。



(a) 未去除背景项的关联成像峰值信噪比随信号阶数变化关系图
(b) 去除背景项的关联成像峰值信噪比随信号阶数变化关系图
(a) Curve of PSNR vs signal order of correlated imaging without background subtraction
(b) Curve of PSNR vs signal order of correlated imaging with background subtraction

图 11 切向运动目标关联成像的峰值信噪比曲线

Fig.11 PSNR curve of correlated imaging for tangential moving target



(a) 未去除背景项的关联成像峰值信噪比随信号阶数变化关系图
(b) 去除背景项的关联成像峰值信噪比随信号阶数变化关系图
(a) Curve of PSNR vs signal order of correlated imaging without background subtraction
(b) Curve of PSNR vs signal order of correlated imaging with background subtraction

图 12 轴向运动目标关联成像的峰值信噪比曲线

Fig.12 PSNR curve of correlated imaging for axial moving target

笔者知道，关联成像作为一个统计迭代过程，每

一次产生的噪声通常比较小,但是在经过加权平均后产生的噪声项却将会变得非常大,随着强度关联阶数的增加,关联函数中对成像有影响项会非常多,从而导致在经过统计加权后的关联重建图像的质量有着极大的下降,所以强度关联阶数越高,关联成像需要通过更多的采样次数来将噪声项减弱,而对于运动目标的关联成像研究中,因为在准静态估计的条件下,一段采样数收集的物体的信息在物体运动后将会改变桶探测器收集来的总光场强度值,这一段采样数是不足以完好地恢复出物体的信息,所以运动目标的关联成像质量也将会急剧下降。在刚才的仿真图像中发现,相比较切向运动目标,强度关联阶数的增加对轴向运动目标的关联重建图像质量影响更大,这可能是由于运动目标的关联成像中,强度关联阶数的增加对轴向相关深度^[9]的影响更大所致。

综上所述,可以发现,随着阶数的增加,未去除背景项的成像方式对于运动目标关联成像有一定的改善作用,并且存在一个关联成像质量最好的最佳阶数,但是依然无法去除目标的运动所造成的运动模糊,同时,在实际实验中,由于背景项可以在算法上去除,所以去除背景项的关联成像更有实际应用价值,而由于强度关联阶数的增加,也极大地增加关联成像的噪声,并且对轴向运动目标的影响更大。所以还是低阶的关联成像在研究运动目标关联成像有优势。

必须指出的是,因为在理论研究中,通常假设运动目标的运动范围始终在桶探测器平面内,即假设桶探测器始终可以完全接收到物体的信息,但在可能的实际应用过程中,运动目标可能不会一直在桶探测器平面内运动,所以可以通过增加桶探测器的数量充分收集物体的信息,这也是增加强度关联阶数对于在运动目标关联成像研究的最大优势。

3 结 论

提出了利用不同强度关联阶数研究运动目标关联成像,理论和仿真实验研究了改变参考光束阶数、信号光束阶数分别对切向和轴向运动目标关联成像质量的影响。结果表明,对于运动目标的关联成像,在未去除背景项情况下,增加信号光束阶数可以改

善关联成像质量,增加参考光束的阶数不能改善关联成像的质量,而在去除背景项的情况下,无论是增加信号光束阶数还是参考光束阶数,其成像质量都会下降,并且轴向运动目标关联成像质量下降地会更加严重,反而最低阶的成像质量最好。在一个实际的运动目标关联成像系统中,通过增加桶探测器的方式能够更多的收集目标的信息,为使用多探测器的运动目标关联成像研究提供了一种新的思路。

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] Bennink R S, Benley S J, Boyd R W. Quantum and classical coincidence imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(3): 3601-3605.
- [3] Cheng Jing, Han Shensheng. Incoherent coincidence imaging and its applicability in x-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 3903-3907.
- [4] Han Shensheng, Gong Wenlin, Chen Mingliang, et al. Research progress of GISC lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2548-2555. (in Chinese)
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): 2548-2555.
- [5] Xiang Qing, Yang Kecheng, Yu Long, et al. Reflective underwater ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711002. (in Chinese)
项青, 杨克成, 于龙, 等. 反射式水下量子成像[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711002.
- [6] Wu Nan, Gong Wenlin, Han Shensheng. Experimental research on pseudo-thermal light ghost imaging with random phase plate based on variable motion trail [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711005. (in Chinese)
吴楠, 龚文林, 韩申生. 基于运动轨迹可调式随机相位板的赝热光鬼成像实验研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711005.
- [7] Yang Xu, Zhang Yong, Yang Chenghua, et al. Improve quality of ghost imaging with multi-wavelength source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0314002. (in Chinese)
杨旭, 张勇, 杨成华, 等. 多波长光源提高关联成像的成像质量[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0314002.
- [8] Li Hu, Xiong Jin, Zeng Guihua. Lensless ghost imaging for

- moving objects [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 895–900.
- [9] Gong Wenlin, Han Shensheng. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging [J]. *Optical Society of America*, 2010, 27(4): 675–678.
- [10] Li Xiaohui, Deng Chenjin, Chen Mingliang, et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153–157.
- [11] Zhang Cong, Gong Wenlin, Han Shensheng. Ghost imaging for moving targets and its application in remote sensing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (12): 204–207. (in Chinese)
张聪, 龚文林, 韩申生. 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): 204–207.
- [12] Zhang Cong, Gong Wenlin, Han Shensheng. Improving imaging resolution of shaking targets by fourier-transform ghost diffraction[J]. *Applied Physical Letters*, 2013, 102(2): 021111.
- [13] Liu Qian, Chen Xihao, Luo Kaihong, et al. Role of multiphoton bunching in high-order ghost imaging with thermal light sources [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053844: 053841–053848.
- [14] Cao Dezhong, Xiong Jun, Zhang Suheng, et al. Enhancing visibility and resolution in Nth-order intensity correlation of thermal light [J]. *Applied Physical Letters*, 2008, 92(20): 201102.
- [15] Chen X H, Agafonov I N, Luo K H, et al. High-visibility, high-order lensless ghost imaging with thermal light [J]. *Optical Letters*, 2010, 35(8): 1166–1168.