

激光光强扰动对相干场成像降质影响理论研究

程志远 马彩文 马青

Theoretical research of influence of laser intensity fluctuation on imaging quality degradation of coherent field

Cheng Zhi-Yuan Ma Cai-Wen Ma Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 244202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.244202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有余弦-高斯关联结构函数部分相干贝塞尔-高斯光束的传输性质及四暗空心光束的产生

[Propagation properties of nonuniform cosine-Gaussian correlated Bessel-Gaussian beam through paraxial ABCD system and generation of dark-hollow beam array](#)

物理学报.2017, 66(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164202>

基于谱域相位分辨光学相干层析的纳米级表面形貌成像

[Nanoscale surface topography imaging using phase-resolved spectral domain optical coherence tomography](#)

物理学报.2017, 66(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154202>

基于自适应桶中功率评价函数的光纤放大器相干合成实验研究

[Experimental study on coherent beam combination of fiber amplifiers using adaptive power-in-the-bucket cost function](#)

物理学报.2013, 62(22): 224202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224202>

孪生光束干涉法测量光源的空间相干性

[Measurement of the spatial coherence of extended light source by twin beams-interference method](#)

物理学报.2013, 62(21): 214203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214203>

多单元光纤激光阵列的倾斜控制实验研究

[Experimental research of tip/tilt control of a multi-channel fiber-laser array](#)

物理学报.2013, 62(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024206>

激光光强扰动对相干场成像降质影响理论研究*

程志远^{1)†} 马彩文¹⁾ 马青²⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2) (西安建筑科技大学, 西安 710055)

(2017年1月24日收到; 2017年4月17日收到修改稿)

激光相干场成像系统发射多束激光, 经大气传输对远程目标成像, 大气湍流引起的激光束光强扰动是影响成像质量的一个关键因素. 本文从湍流引起的激光束光强扰动对回波解调信号的影响关系入手, 建立了激光回波光强扰动因子对相位闭合系数和成像频谱分量的降质传函理论模型; 基于三光束激光相干场成像系统仿真验证了理论模型的有效性. 研究表明激光相干场成像频谱分量和成像像质主要受三光束相位闭合求解算法中第二光束光强扰动影响. 该研究揭示了激光回波光强扰动对成像像质的影响机理, 对于分析大气湍流引起的光强扰动降质效应和合理分配多光束光强稳定性以提高成像质量具有理论指导意义.

关键词: 激光光强扰动, 频谱误差, 成像质量, 激光相干场成像

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.66.244202

1 引言

近年来, 基于信息重建理论的计算成像技术引起了国内外学者的广泛关注^[1,2], 激光相干场成像是其中一种新型高分辨率计算成像方法, 通过拉长发射激光束间的干涉基线长度提高分辨率^[3,4], 具有口径容易做大, 采用低成本点探测器就可实现高分辨成像等优势, 该技术可推广应用于远程微弱目标观测领域, 对于新型高分成像学科发展有着重要意义.

针对激光相干场成像质量影响问题, 国内外学者主要从激光发射阵列、噪声、图像重建与像质提升、大气湍流扰动等方面开展研究: 1) 激光发射阵列构型与分辨率影响关系, 发射孔径数量、激光束孔径误差等与像质传函影响关系研究^[5-9]; 2) 噪声测量和降噪方法研究^[10,11]; 3) 频谱采样、图像重建、像质提升方法研究^[12-14]; 4) 大气湍流扰动对像质影响和湍流抑制技术研究等^[15-20]. 已有研究表明, 大气湍流引起的激光束光强扰动是影响像质

的一个重要因素^[21], 目前关于激光光强扰动对像质影响研究公开报道较少, 激光回波光强扰动对像质影响相关理论尚不完善.

为了揭示大气湍流等引起的激光束光强扰动对相干场成像像质的影响机理, 完善激光相干场像质影响理论, 为后续抑制湍流光强闪烁效应, 提升像质提供理论依据. 本文建立了激光回波光强扰动对相位闭合系数和图像重建频谱分量的降质传函理论模型, 仿真验证了激光回波光强扰动对像质影响理论模型的有效性, 得出像质主要受三光束相位闭合算法求解顺序中第二束光光强扰动影响的结论. 本研究对于后续有针对性地抑制大气湍流引起的激光光强扰动降质效应, 提升成像像质具有重要意义.

2 光强扰动对像质影响的理论建模

地基激光相干场成像系统在对远程空间目标成像的过程中, 发射的多束激光经过大气长距离传输后, 不可避免地会受到大气湍流影响, 大气湍流

* 陕西省自然科学基金(批准号: 2017JM6035)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: czy@opt.ac.cn

光强闪烁引起激光回波光强扰动带来解调信号误差和相位闭合系数误差, 并进而影响各阶频谱分量的求解精度, 最终降低系统的成像质量. 本节建立激光光强扰动因子对成像频谱分量影响传函理论模型.

2.1 光强扰动对激光回波场信号的影响

在发射孔径个数和孔径间距相同的情况下, T型发射阵列具有分辨率高、通用性强的特点^[7], 故本文基于相干场成像三光束T型激光发射阵列, 研究建立激光回波光强扰动效应对激光回波信号和成像频谱分量的传函理论模型. 本文把三光束激光相干成像系统的固定光束称为第一光束, 剪切光束称为第二光束, 移动光束称为第三光束.

三束空间位置不同的激光束, 对距离 R 处目标扫描后反射的激光回波场信号 $S(t)$ 可表示为激光回波光强信号 $I(x, y, t)$ 与目标强度反射函数 $O(x, y)$ 的卷积:

$$\begin{aligned} S(t) &= \iint I(x, y, t) O(x, y) dx dy \\ &= (A_1 A_2 + A_1 A_3 + A_2 A_3) O_0 \\ &\quad + A_1 A_2 \left[e^{-i(\Delta\omega_{12}t + \Delta\varphi_{12})} O(f_{x12}, f_{y12}) \right. \\ &\quad \left. + e^{i(\Delta\omega_{12}t + \Delta\varphi_{12})} O^*(f_{x12}, f_{y12}) \right] \\ &\quad + A_1 A_3 \left[e^{-i(\Delta\omega_{13}t + \Delta\varphi_{13})} O(f_{x13}, f_{y13}) \right. \\ &\quad \left. + e^{i(\Delta\omega_{13}t + \Delta\varphi_{13})} O^*(f_{x13}, f_{y13}) \right] \\ &\quad + A_2 A_3 \left[e^{-i(\Delta\omega_{23}t + \Delta\varphi_{23})} O(f_{x23}, f_{y23}) \right. \\ &\quad \left. + e^{i(\Delta\omega_{23}t + \Delta\varphi_{23})} O^*(f_{x23}, f_{y23}) \right], \quad (1) \end{aligned}$$

式中,

$$\begin{aligned} O(f_{xij}, f_{yij}) &= \iint O(x, y) e^{-i2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy; \\ O^*(f_{xij}, f_{yij}) &= \iint O(x, y) e^{i2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy; \\ O_0 &= \iint O(x, y) dx dy; \end{aligned}$$

$ij = 12, 13, 23$; A_1, A_2, A_3 分别为光束1、光束2、光束3光强振幅; $f_{xij} = \Delta x / \lambda R$, $f_{yij} = \Delta y / \lambda R$, 其中 $\Delta x, \Delta y$ 分别为激光束发射孔径在 x 轴和 y 轴的位置坐标(如图1所示), λ 为激光光波波长; $\Delta\omega_{ij}$ 和 $\Delta\varphi_{ij}$ 分别为两两光束之间的频差和随机相位差; t 为当前时刻.

设采样周期为 T 、采样点数为 N , 信号频差为 $\Delta\omega$, 当满足 $N\Delta\omega T = 2n\pi$ 条件时, 激光回波信号离散采样简化处理后, 可得到三光束两两拍频后的三组拍频解调信号分量 P_{12}, P_{13}, P_{23} :

$$\begin{aligned} P_{12}(f_{x12}, f_{y12}) &= \sum_{k=0}^{N-1} M(kT) e^{i\Delta\omega_{12}kT} \\ &= N \cdot A_1 A_2 \cdot O_{12}(f_{x12}, f_{y12}) e^{i\Delta\varphi_{12}}, \\ P_{13}(f_{x13}, f_{y13}) &= \sum_{k=0}^{N-1} M(kT) e^{i\Delta\omega_{13}kT} \\ &= N \cdot A_1 A_3 \cdot O_{13}(f_{x13}, f_{y13}) e^{i\Delta\varphi_{13}}, \\ P_{23}(f_{x23}, f_{y23}) &= \sum_{k=0}^{N-1} M(kT) e^{i\Delta\omega_{23}kT} \\ &= N \cdot A_2 A_3 \cdot O_{23}(f_{x23}, f_{y23}) e^{i\Delta\varphi_{23}}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $M(kT)$ 为激光回波场信号 $S(t)$ 一个采样周期内离散采样数据; O_{12}, O_{13}, O_{23} 分别为三个频谱分量. 由回波场信号解调表达式(2)可知, 三组拍频解调信号分量 P_{12}, P_{13}, P_{23} 分别受光束1和光束2光强振幅 A_1 和 A_2 、光束1和光束3光强振幅 A_1 和 A_3 、光束2和光束3光强振幅 A_2 和 A_3 的影响.

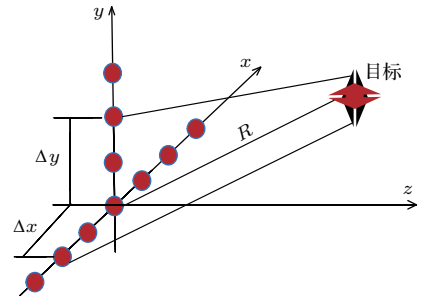


图1 (网刊彩色) 激光发射阵列示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of transmitting laser beam.

2.2 光强扰动对相位闭合系数的影响

由于(2)式解调信号中含有大气湍流扰动引起的随机相位 $\Delta\varphi_{ij}$, 其可由相位闭合技术加以抑制, 从而降低大气湍流相位扰动引起的像质退化效应. 相位闭合原理如图2所示, 由相位闭合技术可逐次求解得到各阶相位闭合系数: $R_{123}, R_{124}, R_{125}, \dots$,

R_{12n} . 相位闭合系数 R_{12n} 的通用表达式为

$$R_{12n} = A_2(t_n)^2 \cdot \frac{O_{12}(f_{x12}, f_{y12}) \cdot O_{2n}(f_{x2n}, f_{y2n})}{O_{1n}(f_{x1n}, f_{y1n})} \cdot N, \quad (3)$$

式中 $n = 3, 4, 5, \dots, N - 1, N$; $A_2(t_n)$ 为第二束剪切光束 t_n 时刻的瞬时光强振幅, 由于湍流引起光强随时间随机扰动变化, 进而相位闭合系数 R_{12n} 成为随光束光强和时间变化的随机变量.

如果第二光束光强恒定, $A_2(t_n)$ 当作常数处理, 不影响后续频谱分量的求解和成像像质. 若存在大气湍流光强扰动, 第二光束(剪切光束)光强随机波动, 由此带来相位闭合系数求解误差. 由(3)式可知, 相位闭合系数受第二光束光强振幅扰动因子 $A_2(t_n)^2$ 影响.

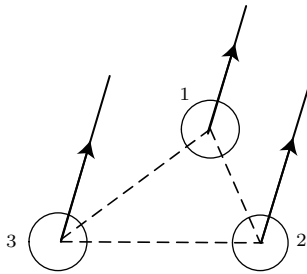


图2 三光束相位闭合示意图

Fig. 2. Schematic diagram of phase closure.

2.3 光强扰动对成像频谱分量的影响建模

求解得到相位闭合系数后需要由低阶频谱分量 O_{12} 逐级重建高阶频谱分量 O_{1n} , 由图3所示频谱重建原理, 可逐次得到高阶频谱分量 O_{1n} :

$$O_{1n} = A_2(t_n)^2(O_{12} * O_{2n})/R_{12n}. \quad (4)$$

由(4)式可知, 如果在整个调制采样过程中, 第二光束光强振幅因子保持不变, 光强 $A_2(t_n)^2$ 当做常数项处理, 重建频谱分量不受第二光束光强扰动的影响. 而实际激光在大气长距离传输过程中, 第二光束光强受湍流扰动影响光强产生不同强度的随机波动, 频谱采样过程中第二光束在第1采样时刻的光强振幅 $A_2(t_1)$ 与第2采样时刻的光强 $A_2(t_2)$ 及第 n 时刻的光强振幅 $A_2(t_n)$ 不再相等, 即

$$A_2(t_1)! = A_2(t_2)! = A_2(t_3)! = \dots A_2(t_{n-1})! \\ = A_2(t_n).$$

故频谱迭代条件弱满足或不满足, 即

$$O_{j(j+n)!} = O_{(j+1)(j+n+1)}. \quad (5)$$

因此由低阶频谱分量 O_{12} 逐级迭代求解高阶频谱分量 O_{1n} 时, 带来频谱重建误差, 由频谱分量重建图像后, 进而影响成像像质. 由上述分析可得: 三光束相干成像系统, 像质主要受相位闭合求解顺序中的第二光束光强振幅扰动的影响.

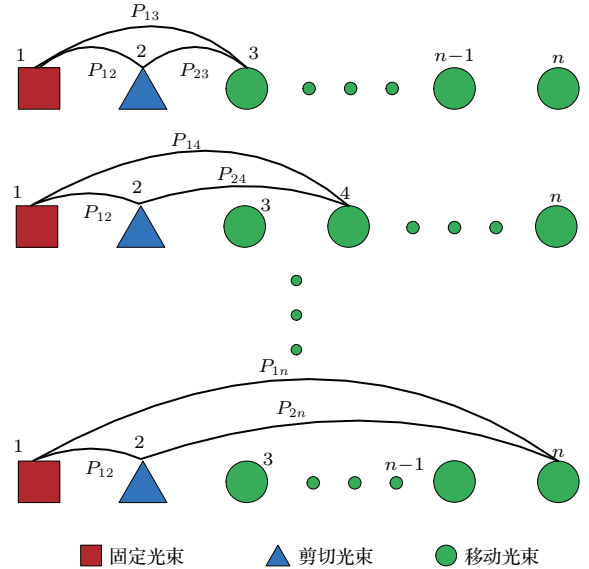


图3 (网刊彩色) 频谱重建示意图

Fig. 3. (color online) Schematic diagram of spectrum reconstruction.

2.4 成像质量评价

为分析激光相干场系统重建图像质量, 用斯特列尔比 (Strehl ratio, SR) 定量化评估像质, 其物理意义是求解原始图像和重建图像归一化相关函数. SR 定义式为

$$Strehl = \frac{\left| \iint O(f)N(f)df_xdf_y \right|^2}{\iint O(f)O^*(f)df_xdf_y \iint N(f)N^*(f)df_xdf_y}, \quad (6)$$

其中 $O(f)$ 和 $N(f)$ 分别为原始图像和重建图像强度分布函数, $O^*(f)$ 和 $N^*(f)$ 分别为原始图像和重建图像的共轭函数. 两幅强度分布相同的图像, SR 为 1, SR 比值越大说明两幅图像越接近.

3 光强扰动对像质影响的实验与结果

本节基于三光束T型激光发射阵列相干场成像实验系统,分别模拟不同组合的三光束光强扰动对重构图像的降质影响.下文仿真所用相位闭合算法都以第二束光为中间光束的顺序求解相位闭合系数.实验中分别对第一光束、第二光束、第三光束不同组合模拟光强扰动,以模拟不同光束对成像质量的影响,并重建目标图像,用SR定量化评估不同强度激光回波光强扰动下的成像像质,比较不同光束光强扰动降质后的像质.

仿真实验条件:观测距离800 km;目标尺寸1.8 m;T型发射阵列 x 轴孔径个数11, y 轴孔径个数5;T型阵列 x 轴臂长5.8 m; y 轴臂长2.9 m;相干场成像等效孔径6.5 m;激光波长1064 nm.仿真实验所用的原始目标如图4所示.

分别对三光束模拟大气湍流等引起的激光回波光强扰动对像质影响效应:1)第一组,三束光光强恒定,都无光强扰动,直接重构得到目标图像如图5(a)所示;2)第二组,只对第一光束(固定光束)模拟激光光强扰动,模拟第一光束(固定光束)受湍流光强闪烁对像质的影响,重构得到目标图像如图5(b)所示,可见第一光束(固定光束)受湍流光强扰动后对像质无影响;3)第三组,只对第三光束(移动光束)添加光强扰动,模拟第三光束(移动光束)光强扰动对像质的影响,重构得到目标图像如图5(c)所示,可见第三光束(移动光束)光强扰动对像质无影响;4)第四组,对第一光束(固定光束)和第三光束(移动光束)模拟光强扰动,重构得到目标图像如图5(d)所示,可见该两束光光强扰动对像质无影响;5)第五组,只对第二光束(剪切光束)添加光强扰动,模拟第二光束(剪切光束)光强扰动对像质的影响,重构得到目标图像如图6(a)—(l)所示,可见此情形下光强扰动对像质有影响;6)第六组,分别对第一光束(固定光束)和第二光束(剪切光束)添加光强扰动效应,模拟这两束光光强扰动对像质的影响,重构得到的目标图像与图6(a)—(l)相同,在此不再赘述,可见此情形下光强扰动对像质有影响;7)第七组,分别对第二光束(剪切光束)和第三光束(移动光束)添加光强扰动,模拟这两束光光强扰动对像质的影响,重构得到目标图像与图6(a)—(l)相同,在此不再赘述,可见此情形下光

强扰动对像质有影响;8)第八组,三束光都添加光强扰动,分别对第一光束(固定光束)、第二光束(剪切光束)和第三光束(移动光束)添加光强扰动,模拟三束光光强扰动对像质的影响,重构得到目标图像与图6(a)—(l)相同,在此不再赘述,三束光同时存在光强扰动对像质有影响.

由上述各组实验结果可知,前四组实验的共同特征是第二束光无光强扰动,成像结果相同,如图5所示,可见第一束光和第三束光光强扰动不影响成像像质.后四组实验的共同特征是第二束光有光强扰动,成像结果相同,如图6(a)—(l)所示,可见引起成像像质退化的真正原因是由第二光束(剪切光束)光强扰动变化引起的.

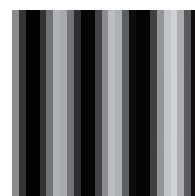


图4 原始目标图像

Fig. 4. Original target.

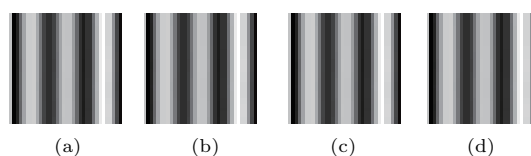


图5 (a)无激光光强扰动重构图像;(b)第一光束光强扰动后重构图像;(c)第三光束光强扰动后重构图像;(d)第一光束和第三光束光强扰动后重构图像

Fig. 5. (a) Reconstructed image with no turbulence intensity fluctuation; (b) reconstructed image with the first laser intensity fluctuation; (c) reconstructed image with the third laser intensity fluctuation; (d) reconstructed image with the first and the third laser intensity fluctuation.

激光相干场成像SR随激光光强扰动变化曲线如图7所示,不同激光束光强扰动仿真实验结果表明:1)多光束激光光强扰动对激光相干场成像的影响主要与相位闭合求解算法中第二束光光强扰动有关,其他两束光光强扰动对像质影响不明显;2)由图6(a)—(f)可知,随着第二束光光强扰动的增大,重构图像视觉效果逐步变差;由图7可知,第二束光光强增大至原光强的90%时,图像SR下降6%,实验结果呈现第二束光光强扰动越大像质下降越大的趋势;3)由图6(g)—(l)和图7可知,当激

光光强减弱时, 图像像质下降, 比光束光强变大对像质降质影响更明显, 光强减小至原光强的60%时, 像质下降33%; 4) 由实验结果分析可得, 无论

第二束光光强增大还是光强减弱, 光强变化越大, 像质下降越明显的趋势; 第二束光光强减弱对像质的影响比光强增大的降质影响更大.

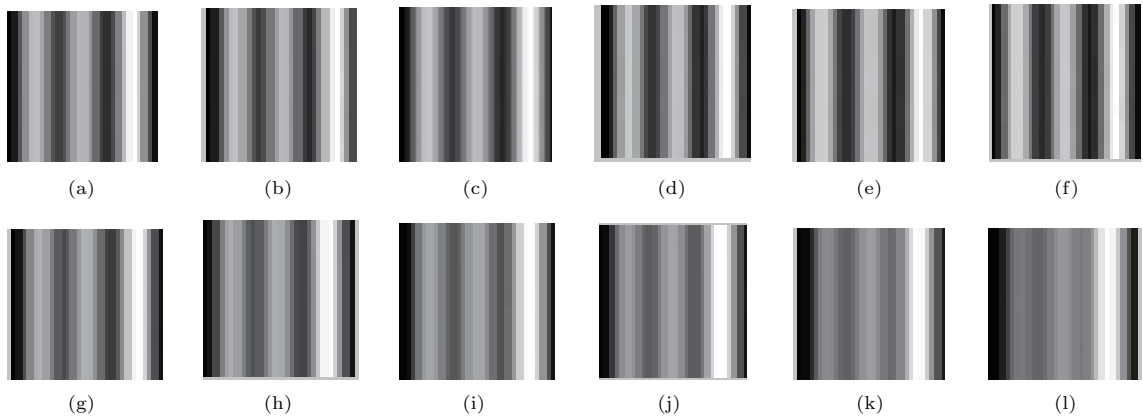


图6 第二光束受不同强度激光光强扰动后重构图像 (a) 光强增大10%; (b) 光强增大20%; (c) 光强增大30%; (d) 光强增大50%; (e) 光强增大70%; (f) 光强增大90%; (g) 光强减小10%; (h) 光强减小20%; (i) 光强减小30%; (j) 光强减小40%; (k) 光强减小50%; (l) 光强减小60%

Fig. 6. Reconstructed images with the second laser intensity fluctuation: The second laser beam intensities in panels (a)—(f) increases by 10%, 20%, 30%, 50%, 70%, 90%, respectively; the second laser beam intensities in panels (g)—(l) decreases by 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, respectively.

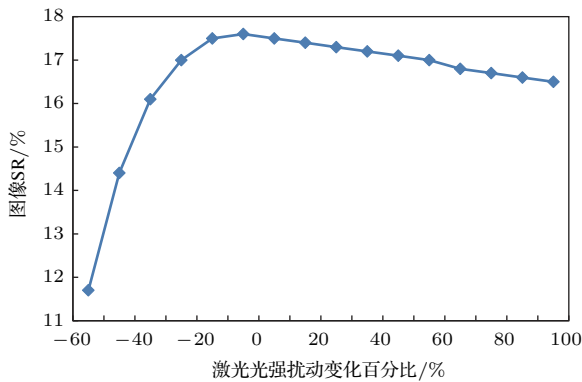


图7 成像SR随光强扰动退化曲线

Fig. 7. Relation between imaging SR and laser intensity fluctuation.

4 结 论

本文从理论建模分析和仿真实验两方面给出了三光束激光相干场成像像质主要受相位闭合求解中第二光束湍流光强扰动影响的结论, 湍流扰动引起的光强减弱对像质影响大于光强变大对像质的影响. 基于本文的理论模型和结论, 在实际应用中, 只需要依据具体情况, 采取湍流抑制技术保证相位闭合求解中第二光束(剪切光束)光强恒定, 可减小大气湍流光强扰动对像质的影响, 不需要三束

光都保持光强恒定, 降低了技术转化难度和工程成本. 研究结果为激光相干场像质分析和湍流光强扰动抑制提供了理论依据和有效的技术支撑, 对于推进激光相干场成像像质改善提升具有重要意义.

5 讨 论

本研究在现有激光相干场成像理论基础上, 揭示了三光束激光相干场成像系统受大气湍流效应等因素引起的激光光强扰动对成像像质影响机理, 得到三光束激光相干场成像系统像质主要受重构算法中相位闭合求解的第二束激光光强扰动影响, 受其他两束激光光强扰动影响较小的结论. 该研究结论对于后续抑制大气湍流等因素引起的激光束光强扰动对三光束激光相干场成像系统像质的影响具有理论指导意义和应用价值. 但由于本文只研究了三光束激光相干场成像系统, 因此所建立的理论模型和得到的研究结论具有一定的使用范围和条件: 只适合三光束激光相干场成像系统; 而对于多于三光束的五光束、六光束或更多光束的激光相干场成像系统, 由大气湍流扰动引起激光光强扰动对成像像质的影响机理和理论模型有待后续进一步研究.

参考文献

- [1] Yao W Q, Huang W H, Yang C P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 034201 (in Chinese) [姚伟强, 黄文浩, 杨初平 2017 物理学报 **66** 034201]
- [2] Zhuang J Y, Chen Q, He W J, Mao T Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 040501 (in Chinese) [庄佳衍, 陈钱, 何伟基, 冒添逸 2016 物理学报 **65** 040501]
- [3] Holmes R B, Brinkley T 1999 *Proc. SPIE* **3815** 11
- [4] Cuellar E L, Cooper J, Mathis J, Fairchild P 2008 *Proc. SPIE* **7094** 70940G
- [5] Ye S, Liu Y, Wu J 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 611 (in Chinese) [叶溯, 刘艺, 吴健 2011 强激光与粒子束 **23** 611]
- [6] Li Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Chinese Academy Sciences University) (in Chinese) [李杨 2013 博士学位论文 (西安: 中国科学院大学)]
- [7] Cheng Z Y, Ma C W, Luo X J, Zhang Y, Zhu X P, Xia A L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124203 (in Chinese) [程志远, 马彩文, 罗秀娟, 张羽, 朱香平, 夏爱利 2015 物理学报 **64** 124203]
- [8] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李扬, 伍洲, 周志胜 2013 物理学报 **62** 164203]
- [9] Yu S H, Dong L, Liu X Y, Ling J Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 184205 (in Chinese) [于树海, 董磊, 刘欣悦, 凌剑勇 2015 物理学报 **64** 184205]
- [10] Belen'kii M, Hughes K, Brinkley T 2002 *Proc. SPIE* **4821** 62
- [11] Cheng Z Y, Luo X J, Ma C W, Zhang Y, Liu H, Zhu X P 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 0407002 (in Chinese) [程志远, 罗秀娟, 马彩文, 张羽, 刘辉, 朱香平 2015 光子学报 **44** 0407002]
- [12] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y, Wang G C 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0811001 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦, 王国聪 2013 光学学报 **33** 0811001]
- [13] Zhou Z X, Xiang L B, Zhang W X, Li Y 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0511005 (in Chinese) [周志盛, 相里斌, 张文喜, 李杨 2014 光学学报 **34** 0511005]
- [14] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y, Wang L 2015 *Opt. Precision Eng.* **23** 282 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦, 王亮 2015 光学精密工程 **23** 282]
- [15] Liu Y Y, Lü Q B, Zhang W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124201 (in Chinese) [刘扬扬, 吕群波, 张文喜 2012 物理学报 **61** 124201]
- [16] Li Y, Xiang L B, Zhang W X 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 292 (in Chinese) [李扬, 相里斌, 张文喜 2013 强激光与粒子束 **25** 292]
- [17] Cuellar E L, Stapp J, Cooper J 2005 *Proc. SPIE* **5896** 58960D
- [18] Stapp J, Spivey B, Chen L, et al. 2006 *Proc. SPIE* **6307** 630701
- [19] Rhodes W T 2012 *Appl. Opt.* **51** A11
- [20] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y 2013 *Inf. Laser* **42** 1582 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦 2013 红外与激光工程 **42** 1582]
- [21] Zeng Z H, Luo X J, Wang B F, Xia A L, Cheng Z Y, Si Q D 2014 *Acta Photon. Sin.* **43** 0601002 (in Chinese) [曾志红, 罗秀娟, 王保峰, 夏爱利, 程志远, 司庆丹 2014 光子学报 **43** 0601002]

Theoretical research of influence of laser intensity fluctuation on imaging quality degradation of coherent field*

Cheng Zhi-Yuan^{1)†} Ma Cai-Wen¹⁾ Ma Qing²⁾

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechnics of Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China*)

2) (*Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

(Received 24 January 2017; revised manuscript received 17 April 2017)

Abstract

The laser coherent field imaging system emits multiple beams of laser from earth to space, and laser scans remote space target by passing through turbulence atmosphere. Multi-beam laser intensity fluctuation caused by atmosphere turbulence is a key factor affecting high-resolution imaging quality of the coherent field imaging system. Aiming at solving the problem of imaging quality degradation caused by laser intensity fluctuation error, we discuss the mechanism of laser intensity fluctuation error influencing the imaging quality of laser coherent field high-resolution imaging system. The theoretical model about the relationship between laser intensity fluctuation factor and imaging quality is proposed for the first time. Firstly, the laser echo field signal error induced by laser intensity amplitude fluctuation factor is deduced according to laser transmitting atmosphere theory. Then adopting multi-beam phase closure arithmetic, the phase closure coefficient error is derived from the laser intensity fluctuation factor and laser echo field signal. The mechanism of disturbed laser echo signal influencing phase closure coefficient is investigated in detail. In the following, based on reconstructed spectrum theory, the model of imaging frequency spectrum error propagation, caused by laser intensity fluctuation factor, is proposed. Finally, we reveal the mechanism of laser intensity amplitude fluctuation factor influencing reconstructed imaging frequency spectrum and imaging quality. The correctness and validity of the theoretical model are verified in simulation experiment. In the three-beam laser coherent field imaging simulation experiment, the imaging quality is evaluated by the Strehl ratio of the image. Experimental result shows that the Strehl ratio is only related to the light intensity fluctuation of one of the three beams of laser, and the greater the fluctuation of laser intensity, the more serious the degradation of imaging quality is. The research draws the conclusion that the reconstructed imaging frequency spectrum and image quality are mainly affected by the laser intensity fluctuation of the second beam in the three-beam phase closure algorithm, regardless of other two laser intensity fluctuations. Thus, in order to restrain the degradation of imaging quality caused by laser intensity fluctuation, we only need to keep stable the laser intensity of the second beam but not all of the laser beams. In this paper, we reveal the mechanism of laser intensity fluctuation affecting high-resolution imaging quality in the three-beam laser coherent field imaging system. The research provides a theoretical basis for analyzing imaging quality degradation from the laser intensity fluctuation caused by atmospheric turbulence, and reasonably assigning the light intensity stability of multi-beam laser emitter to improve the imaging quality in laser coherent field imaging system.

Keywords: laser intensity fluctuation, frequency spectrum error, imaging quality, laser coherent field imaging

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.66.244202

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017JM6035).

† Corresponding author. E-mail: czy@opt.ac.cn