

文章编号:1002-2082(2019)03-0411-05

多光束激光相干成像孔径偏差对成像质量影响

张羽, 罗秀娟, 刘辉, 陈明徕, 程志远, 兰富洋

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:多光束激光相干场成像技术突破传统概念,采用微小频移的光束组两两干涉提取目标的傅里叶分量,通过目标频谱傅里叶逆变换获得目标高分辨率图像。该技术仍处于实验室原理验证向实体阵列过渡的研究阶段。在这一过程中多种影响因素对成像质量产生着影响。其中发射阵列的孔径位置误差分布规律以及控制范围一直缺乏较为系统的理论支撑。从傅里叶望远镜发射阵列的光场传输特性入手,分析了在基线不同位置引入孔径误差时对成像质量的影响。并分析出孔径位置精度的要求与分布规律,同时针对这一分布规律提出了孔径位置的相对误差精度,计算机仿真分析得出相对误差精度应控制在5%以内不影响成像质量。该研究为傅里叶望远镜发射阵列的设计与装调提供了理论依据,为傅里叶望远技术的工程化实现奠定一定的理论基础。

关键词:相干场成像;傅里叶望远技术;瞄准精度;孔径位置;成像质量

中图分类号:TN249

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0302001

Research on distribution of aperture position error in multi-beam coherent imaging and its impact on image quality

ZHANG Yu, LUO Xiujuan, LIU Hui, CHEN Minglai, CHENG Zhiyuan, LAN Fuyang

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: As the research of coherent imaging (Fourier telescoping) in the procedure from laboratory experiments to the real system, there are many factors that may impact on the realization. However, among the factors and analysis, there has not been a theoretical support for calibrating the aperture position error distribution and the error range. In this article, based on the optical transportation theory, the aperture position error distribution and its impact on image quality were analyzed. The paper also proposed the error range and carried out the experimental setups. The results demonstrate that the relative position error should be controlled less than 5%. To sum up, this article provide a theoretical method to analyze the design and the configuration of the real Fourier telescoping.

Key words: coherent field imaging; Fourier telescoping; aiming accuracy; aperture position; imaging quality

引言

多光束相干场技术(即傅里叶望远成像技术)提出以来,针对上行链路的研究主要包含了孔径排布方式^[1-3]、阵列规模^[4]、湍流路径研究以及激光源特性研究^[5-7]等。然而在发射阵列各孔径位置的

设计与装调过程中,针对不同基线位置的孔径误差对成像质量有何种影响,影响程度如何,误差应控制在何种量级以内等问题,在理论层面还尚未有较为详细的分析。T型发射阵列中,各光束的出射口径位置决定了其形成各组干涉条纹的空间

收稿日期:2018-08-15; 修回日期:2018-11-19

基金项目:国家自然科学基金(61505248)

作者简介:张羽(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事激光相干场高分辨率成像研究。E-mail:yuzhang16@opt.ac.cn

频率。当其中某几个孔径由于装配误差或在维护周期内出现偏移等因素未能按照预定的位置发射光束时,在此处采集的目标空间频率便会发生变化,引起傅里叶分量的混叠,影响图像重构。因此需要在分析孔径位置误差规律的基础上,对误差的范围提出要求。本文首先分析孔径位置的绝对误差,提出在 T 型阵列中误差的分配规律,在此基础上,对每一基线位置的孔径,提出了误差允许的范围。本文的研究旨在理论上为傅里叶望远镜发射阵列的实体化提供指导。

1 T 型阵列孔径位置误差规律分析

在多光束相干场成像中,目标的频谱是通过不同阵列位置的光束相互干涉而采样得到的,每组光束均具有严格的发射孔径位置来保证频谱采样的正确性,在 T 型阵列中,阵列孔径往往是等间隔分布。然而,在实际成像过程中,大型阵列的形态往往因地形、温度等因素造成畸变,孔径分布也会由于装配产生间隔分布不均。此时不等间隔的孔径出射的光束会使重构出的频谱面产生频谱漂移^[8]。例如在 T 型阵列频谱特性仿真中,分别在阵列竖轴上的第 3、10、15 的孔径产生 20% 的偏差,频谱面的不均匀性如图 1 所示,此时频谱面有些点未被采样,有些点被多次采样。从而影响目标图像的正确重构^[9-10]。

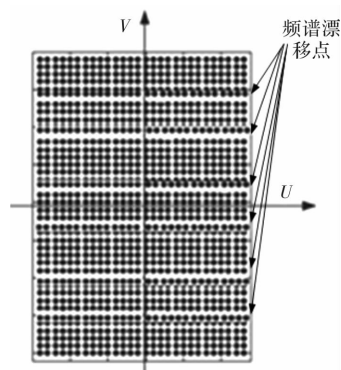


图 1 发射孔径位置有误差对频谱面的影响

Fig. 1 Impact on frequency domain of transmitter aperture position error

本文拟以各个孔径光在空间的光场传播为基础,来分析孔径位置偏差对成像质量的影响。对阵列中每个孔径标注位置记号为 $\rho, \rho_1, \dots, \rho_N, R$ 成像距离,则各光束传播光场^[11-12]表达为

$$u_n(\rho_\Sigma, i\omega) \approx \frac{ik \exp(-ik|R + \gamma_\Sigma - \rho_n|)}{2\pi R} g_n(v_\Sigma) u_n(i\omega) \quad (1)$$

式中: n 表示第 N 束光; $u_n(i\omega)$ 为光束频谱信息; γ_Σ 为光束指向目标表面 Σ 的矢量, $g_n(v_\Sigma) = \int_{A_t} \exp(-ikv_\Sigma \rho) A_n(\rho) d\rho$ 中的 $A_n(\rho)$ 为光束在发射端的振幅场(光束指向是其主要影响因素),而其中的 $\exp(-ikv_\Sigma \rho)$ 部分主要受阵列孔径位置影响。令 $\rho_{\Delta N}$ 为使阵列中某一孔径发生位置偏离的变量,则

$$\begin{aligned} g_n(\gamma_\Sigma) &= \int_{A_t} \exp[-ik\gamma_\Sigma(\rho + \rho_{\Delta N})] A_n(\rho + \rho_{\Delta N}) d\rho \\ &= C \cdot \exp[-ik\gamma_\Sigma(\rho_{\Delta N} + 1)] \int_{A_t} \exp[-ik\gamma_\Sigma(\rho)] A_n(\rho) d\rho = C_1 \cdot \exp[-ik\gamma_\Sigma \gamma_\Sigma(\rho_{\Delta N} + 1)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $C_1 = C \cdot \int_{A_t} \exp[-ik\gamma_\Sigma(\rho)] A_n(\rho) d\rho$, C 为常数,从 $A_n(\rho + \rho_{\Delta N})$ 提取 $\rho_{\Delta N}$ 时生成,将(2)带入(1)得

$$\begin{aligned} u_n(\gamma_\Sigma, i\omega) &\approx C_1 \cdot \frac{ik \exp(-ik|R + \gamma_\Sigma + \rho_N + \rho_{\Delta N}|)}{2\pi R} \cdot \\ &\exp[-ik\gamma_\Sigma(\rho_{\Delta N} + 1)] \cdot u_n(i\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式看出,随着孔径位置畸变的引入,在出射光束的振幅光场处会产生 $\exp[-ik\gamma_\Sigma(2\rho_{\Delta N} + 1)]$ 的复指畸变量。在阵列的实际构建与装备中,各个阵列均有可能引入某一随机偏差 $\rho_{\Delta N}$,本文旨在分析

在不同阵列孔径位置时该随机偏差量对成像质量的影响。

首先在分析 $u_n(\gamma_\Sigma, i\omega)$ 的变化率时,对 $\rho_{\Delta N}$ 求导,得

$$\begin{aligned} u_n(\gamma_\Sigma, i\omega) &= C_1 \cdot \frac{ik \exp(-ik|R + \gamma_\Sigma + \rho_N|)}{2\pi R} \cdot \\ &k\gamma_\Sigma \exp[-ik\gamma_\Sigma(2\rho_{\Delta N} + 1)] \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式说明在阵列 ρ_N 处,引入相同的畸变量 $\rho_{\Delta N}$,光场 $u_n(\rho_\Sigma, i\omega)$ 变化呈负指数分布。即 $\rho_{\Delta N}$ 对基线低频段的影响大于对基线高频段的影响。这就说明在 T 型阵列中,中心位置的孔径精度应比阵列远端孔径精度要求更高。

根据(4)式可知阵列多光束光场叠加为

$$u_n(\gamma_\Sigma, i\omega) \approx \sum_{n=0}^N \frac{ik \exp(-ik|R + \gamma_\Sigma + \rho_N|)}{2\pi R} g_n(\gamma_\Sigma) u_n(i\omega) \quad (5)$$

若阵列中多个孔径位置均发生了偏离,则多个 $\exp[-ik\gamma_\Sigma(2\rho_{\Delta N}+1)]$ 的引入会导致光束形成的干涉条纹发生混乱,主要体现在其空间频率与理想状态不一致,进而影响目标的空间采样效果。通过多次实验表明,孔径位置偏差如果发生在阵列的中心区域(低频区域),即低频采样出现畸变,则对成像质量的影响更为严重。另一方面,若相同的孔径偏差出现在阵列远端(高频区域),则对成像质量影响相对较小。

2 孔径位置相对误差范围

上节说明了阵列各部分孔径定位精度要求的差异性,即远点的精度低于中心区域的位置精度。然而在实际装配的过程中,阵列远点的精度不可

能无限低。此时应引入孔径误差的相对位置精度。相对位置精度由相邻两孔径光束产生的干涉条纹谱宽决定。某一位置两相邻孔径干涉条纹谱宽为

$$\epsilon = \frac{\lambda R}{d_x} \quad (6)$$

式中: d_x 为孔径间距; R 为成像距离; λ 为输出光束。由此可知该条纹的宽度随着孔径间距的畸变而变化。令条纹变化程度为 $\delta\epsilon = c \cdot \epsilon$ (允许条纹宽度变化的比例为 c)。带入(6)式并求导

$$\delta d_x = -\frac{\lambda R}{\epsilon^2} \delta\epsilon = -\frac{c \cdot \lambda R}{\epsilon} \quad (7)$$

经过计算机仿真或者实验验证的途径,均能确定相对孔径误差 δd_x 的允许变化范围。

在计算机仿真中,考虑到阵列中心区域的孔径位置精度要求较高,以中心区域两相邻孔径为例,仿真不同 c 的取值对成像质量的影响变化如图2所示。

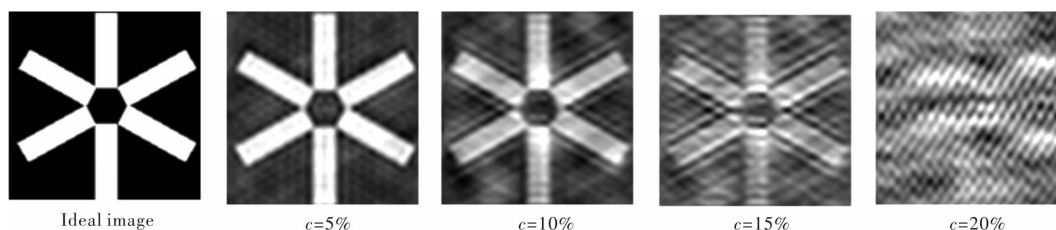


图2 发射孔径位置有误差时的重构图像

Fig. 2 Construction images at different transmitter aperture errors

在 c 取值 1%~20% 时,对原始图像重构后的 Strehl Ratio^[13-14] 值变化如图3所示。

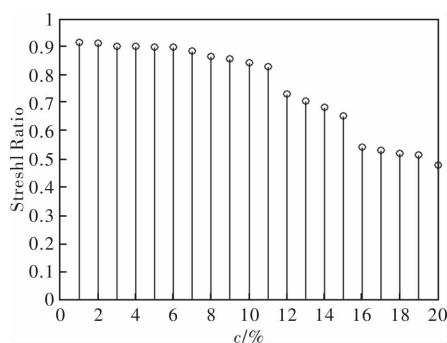


图3 成像质量与干涉条纹变化程度关系

Fig. 3 Relationship between fringe pattern width and image quality

图3显示的 c 值在增加到 6% 后,重构图像质量 Strehl Ratio 开始降低,当大于 10% 后,图像质量显著下降,考虑到实际系统中的其他误差因素,孔径位置偏差造成的条纹畸变范围应不大于 5%。

3 实验系统及测量结果

该实验系统在水平成像距离 1.2 km 的范围展开,T型发射阵列采用3光束扫描的方式遍历整个阵列。其成像系统如图4所示。

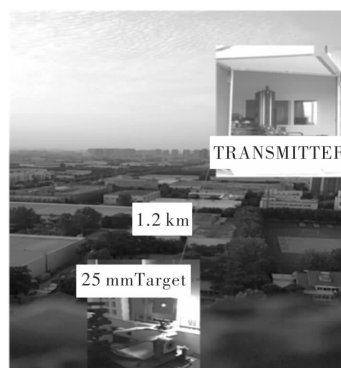


图4 1.2 km 水平路径外场成像实验系统

Fig. 4 Field experiments in 1.2 km range

在图5的T型阵列所构成的频谱面中,为了

分析方便,将其按照由中心向四周扩展的方向分为低、中、高频3个区域(A为低频区,B为中频区,C为高频区)。光束干涉分量在每个区域内均被引入一定的孔径位置误差,从而分析各区域误差对重构图像的影响程度。

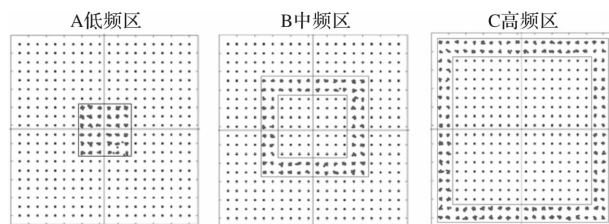


图5 在不同频谱区域引入误差

Fig. 5 Introducing the same error in different frequency zones

当孔径位置误差引入发射阵列后,最直接的体现就在其干涉条纹的空间频率上。本实验将光束的干涉条纹投影至硫酸纸,利用 lumenera 可见光 CCD 相机测量干涉条纹的宽度,如图6所示。此时条纹宽度变化量为 Δx 与发射孔径位移 Δd 的关系为

$$\Delta x = R * \frac{\lambda}{\Delta d} \quad (8)$$

式中: λ 为发射的激光波长; R 为成像距离。由此就建立起了条纹变化与孔径误差偏移量之间的量化关系。随着不同误差的引入,三区域的重构结果如图7所示,重构图像质量的评价采用灰度均值梯度(GMG)方法^[13]。

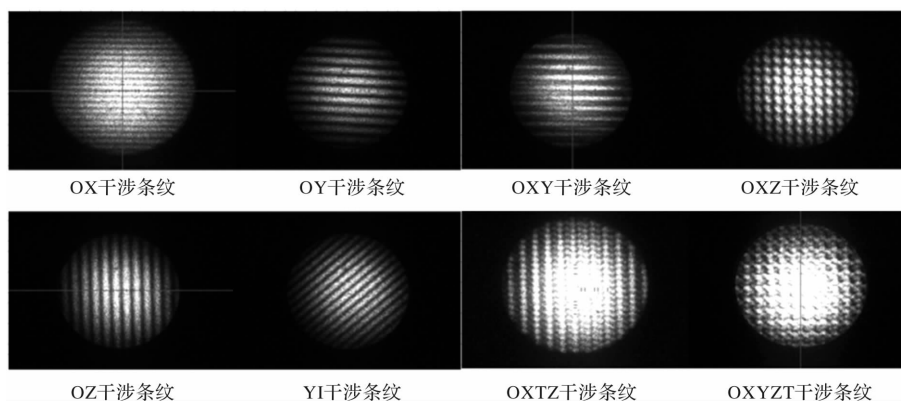


图6 多束光形成的干涉条纹

Fig. 6 Fringe patterns generated by multi-beams

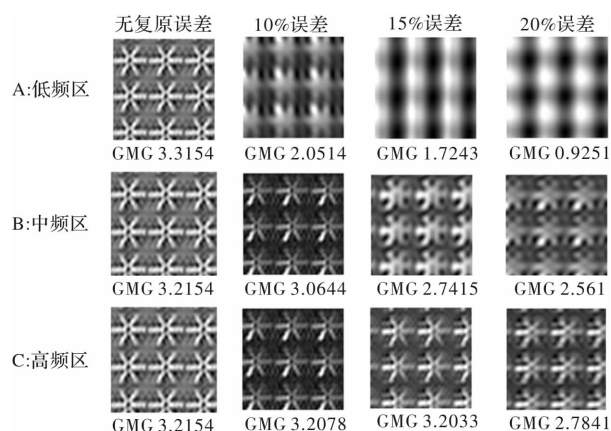


图7 在不同频谱区域引入误差重构图像

Fig. 7 Construction images from different introducing aperture position errors

在3个频谱区域都引入 $10\%d$, $15\%d$, $25\%d$ 的位移误差,当误差引入 10% 时,可看出低频区的 GMG 值下降的最明显,高频区几乎不受影响;随着各个区域的误差加大,当引入 25% 误差时,低频区几乎无法成像,而高频区的 GMG 值有略微下

降。这一变化趋势揭示了在多光束干涉成像中阵列不同位置对与孔径误差的容忍程度有所不同,进一步验证了发射阵列中心区域的孔径定位精度应高于远端孔径精度。这一趋势即为阵列设计提供了精度保障,在装备大型阵列时提升了阵列远端孔径的装配效率^[15]。

4 结论

由分析可知,傅里叶望远镜阵列的孔径位置精度要求在阵列延伸方向可以不一致,总体来说,位于阵列中心处的孔径精度要高于阵列远端的孔径精度要求。然而如果发射阵列足够长,那么远端的位置精度也不是无限降低,文中计算出了在每一个基线位置处,其孔径的相对误差量应控制在此处孔径间干涉条纹宽度的 5% 以内。为傅里叶望远镜发射阵列的设计与装调提供理论支撑,为多光束相干场望远镜的工程化提供了有力的理论支持和技术基础。

参考文献:

- [1] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, et al. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(2): 351-364.
- [2] YU Shuhai, WANG Jianli, DONG Lei, et al. Application informal phase closure about image reconstruction algorithm based on fourier telescropy[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44 (5): 0511002-1-0511002-7.
于树海,王建立,董磊,刘欣悦等.准相位闭合在傅里叶望远镜图像重构算法中的应用[J].光子学报, 2015, 44(5): 0511002-1-0511002-7.
- [3] CHEN Wei, LI Quan, WANG Yangui. Object reconstruction of fourier-telescropy based on all-phase spectrum analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (12):3441-3446.
陈卫,黎全,王雁桂.基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构[J].光学学报, 2010, 30(12): 3441-3446.
- [4] LUO Xiujuan, ZHANG Yu, SUN Xin, et al. Energy design of fourier telescope system in the atmospheric environment[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (8):0801004-1-8.
罗秀娟,张羽,孙鑫,等.大气环境中傅里叶望远镜系统能量设计[J].光学学报, 2013, 33(8): 0801004-1-8.
- [5] ZENG Zhihong, LUO Xiujuan, WANG Baofeng, et al. Laboratory simulation of atmosphere turbulence for fourier telescropy [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 214-220.
曾志红,罗秀娟,王保峰,等.傅里叶望远镜大气湍流模拟实验[J].光子学报, 2014, 43(6): 214-220.
- [6] JAMES S, BRETT S, LAURENCE C, et al. Simulation of a Fourier telescropy imaging system for objects in low earth orbit[J]. SPIE, 2006, 6307(2): 630701-1-11.
- [7] STEPHEN D F, DAVID G V, VICTOR L, et al. Geo light imaging national testbed (GLINT) past, present, and future [J]. SPIE, 1999, 0277 (2): 1-10.
- [8] LUO Xiujuan, ZHANG Yu, GAO Cunxiao, et al. Performance analysis of laser transmitting system for Fourier telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (3):0314001-1-10.
罗秀娟,张羽,高存孝,等.傅里叶望远镜激光发射系统性能分析[J].光学学报, 2015, 35(3): 0314001-1-10.
- [9] KANG Meiling, YANG Chunping, Wu Jian. Reconstruction of uncompleted frequency spectrum images based on Fourier telescropy [J]. SPIE, 2008, 7495 (4): 74954G-1-10.
- [10] ZHANG Wenxi, XIANG Libin, KONG Xinxin, et al. Resolution of coherent field imaging technique [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(16): 169-174.
张文喜,相里斌,孔新新,等.相干场成像技术分辨率研究[J].物理学报, 2013, 62(16): 169-174.
- [11] HOLMES R B. Aperture-synthesis techniques that use very-low-illumination[J]. SPIE, 2008, 2566(3): 177-185.
- [12] CHENG Zhiyuan, MA Caiwen, LUO Xiujuan, et al. Improving coherent field imaging quality by suppressing the influence of transmitting aperture spacing error[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 124203-1-8.
程志远,马彩文,罗秀娟,等.抑制孔径间距误差影响的相干场成像质量提升方法研究[J].物理学报, 2015, 64(12): 124203-1-8.
- [13] WANG Xuexin, YANG Hongru, YU Bing, et al. Calibration and measurement method for IR target under the same solid angle[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 518-521.
王学新,杨鸿儒,俞兵,等.红外目标等立体角标定和测量方法研究[J].应用光学, 2018, 39(4): 518-521.
- [14] ZHANG Yu, LUO Xiujuan, XIA Aili, et al. Image quality evaluation and analysis in fourier telescropy for laboratory demonstration[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 160-165.
张羽,罗秀娟,夏爱利,等.傅里叶望远镜成像质量分析与评价[J].光子学报, 2014, 43(3): 160-165.
- [15] ZHANG Yu. Research on influence factors of imaging quality of fourier telescropy system [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2015.
张羽.傅里叶望远镜系统成像质量影响因素研究[D].北京:中国科学院大学,2015.