

文章编号 1004-924X(2015)01-0083-10

改进的强度相干成像室内实验方法

高 昕^{1*}, 李希宇¹, 王 斌², 吴元昊², 陆长明¹, 唐 嘉¹

- (1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:设计了一种新的强度相干成像室内实验方法,以简化现有强度相干实验过程,获取接近实际观测的测量数据。首先,分析了强度相干成像原理及影响成像质量的因素;介绍了现有强度相干成像实验方法并分析其存在的不足。然后,利用赝热光源和 CCD 设计了一种新的强度相干成像方法;介绍了利用此种方法模拟强度相干成像的原理及特点。最后,进行了室内强度相干成像实验,验证了提出方法的可行性。实验结果表明:利用提出的实验方法能够较好地测量目标的空间功率谱,测量噪声主要分布在高频部分;当测量信噪比大于 20 时,利用相位恢复方法可恢复获得较好的目标光强分布图像。实验显示,提出的成像方法能够较好地模拟强度相干成像,实验中能够较为方便地调节光强随机涨落并观测基线参数,实现对小角直径目标的有效成像。

关键词:合成孔径成像;强度相干成像;空间频谱;相位恢复;赝热光

中图分类号:TH743;O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0083

Improved experiment method for intensity correlation imaging in laboratory

GAO Xin^{1*}, LI Xi-yu¹, WANG Bin², WU Yuan-hao², LU Chang-ming¹, TANG Jia¹

- (1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- * Corresponding author, E-mail: gaoxin526@sina.com

Abstract: An improved experiment method in a laboratory for intensity correlation imaging was designed to simplify the experiment processing of the intensity correlation imaging and to obtain measured data close to the actual observation. Firstly, the theory of intensity correlation imaging and its influencing factors on imaging quality were analyzed. Then, the existing intensity correlation imaging method and its disadvantages were discussed. A new experiment of intensity correlation imaging was designed and implemented by using a pseudothermal light and a CCD array, and the theories and characteristics to simulate the intensity correlation imaging by proposed method were introduced. Finally, the data analysis and imaging experiments were performed to verify the feasibility of the method. Experimental results indicate that the proposed method measures well the spatial

收稿日期:2014-07-30;修订日期:2014-09-17.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA8080110);北京跟踪与通信技术研究所预研基金资助项目

power spectra of the objects, and the measurement noise mainly distributes in the high frequency region. Moreover, the intensity image of the object can be reconstructed by a phase retrieval algorithm when the signal-to-noise ratio is higher than 20. It concludes that this method preferably realizes the simulation of intensity correlation imaging. In the experiment, the adjustment of the intensity random fluctuation and the parameter of observing baseline are more convenient, so that the object with a small angular diameter is easy to be imaged.

Key words: synthetic aperture imaging; intensity correlation imaging; spatial frequency spectrum; phase retrieval; pseudothermal light

1 引言

受大气湍流和望远镜衍射极限的限制,利用现有的地基自适应望远镜仅能实现低轨目标成像,而在进行高轨目标成像时需采用口径超过 30 m 的大口径自适应望远镜,这在技术上和经济上均存在较大难度^[1]。不过,合成孔径成像法^[2]可利用光学望远镜阵列实现高轨目标的高分辨力成像。目前,高分辨力成像方法主要有振幅干涉成像^[3],傅里叶望远镜成像^[4-5]和强度相干成像^[6-7]。其中强度相干成像法具有对设备精度要求低和受大气湍流影响小等优点,故在高轨目标成像领域中具有较大的优势。

强度相干法起初主要应用于恒星角直径测量领域,20 世纪 60 年代 Hanbury 等利用强度干涉仪测量 32 颗恒星的角直径,测量精度达到了亚毫角秒量级^[8]。但受限于光强探测器的采样频率,强度干涉仪测量的信噪比极低,难以用于测量暗弱目标的空间频谱模值。20 世纪 70 年代,随着振幅干涉技术的发展,面向恒星目标的高分辨力成像问题得到部分解决,但当时强度相干成像中采用的高频探测器与高频相关器尚不成熟,此后,强度相干成像技术的发展陷于停滞状态^[9]。

近年来,随着半导体制造工艺的发展,强度相干成像用光强探测器的采样频率和相关器的运算速度较 20 世纪 70 年代有较大提高,强度相干成像法的探测信噪比也随之有所提高。而振幅干涉成像法的分辨力提高难度较大,为获得更高的成像分辨力,强度相干技术重新得到人们的关注。目前强度相干法的相关研究主要集中在恒星目标成像领域。2004 年,密歇根大学的 I. Hussein 等

人提出采用天基强度相干阵列对恒星进行成像测量,并对相干阵列的成像效果进行了仿真^[10]。2011 年,犹他大学的 Nunez 等人提出对切伦克夫望远镜阵列进行改造以实现强度相干法对恒星目标的成像,并研究仿真了强度相干法的成像效果^[11]。

目前,针对恒星与高轨目标的强度相干成像技术仍存在着测量信噪比低和相位恢复复杂等问题,因此需进行模拟实验以对其进行改进。但现有的强度相干成像实验法较为复杂,且在成像过程中仅能测量目标单个空间的频谱模值。本文设计了一种新型的强度相干成像室内实验方法,此方法利用赝热光源代替自然光照射目标,可实现对目标光强随机涨落的调节;利用 CCD 阵列直接探测目标光强随机涨落可同时获得目标的多个空间频谱模值,更为简单地实现对目标的强度相干成像。利用此种成像方法能够较为简单地在室内模拟强度相干成像实验过程,获得接近于实际的模拟观测数据,可为后续信噪比提高方法和相位恢复方法的研究提供参考。该方法能够测量获得目标的空间频谱模值,结合相位恢复方法可获得较好的目标图像。

2 强度相干成像理论

2.1 强度相干成像理论基础

对于非单色光而言,不同频率的光场之间相互叠加会产生拍频,导致光强产生随机涨落,光强随机涨落的频率与光谱宽度成正比。而强度相干成像法通过测量目标不同位置的光强随机涨落来获得目标的空间频谱模值,再结合相位恢复算法实现对目标的成像。

图 1 为强度相干成像示意图。不同位置的大型集光面将目标光强涨落汇集到焦点位置,利用窄带滤光片限制接收光谱宽度以降低光强的随机涨落频率,利用高频光强探测器将目标光强涨落转化成相应的光电流,通过相关器做乘法运算来获得探测器输出光电流涨落的相关度^[12],由此得到两探测器位置上光强涨落的相关度。

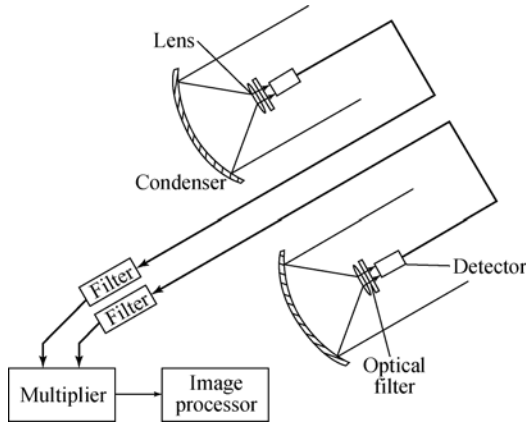


图 1 强度相干成像示意图

Fig. 1 Diagram of intensity correlation imaging

自然目标的光场由目标表面各原子辐射光场叠加而成,各原子的辐射光场相互独立,不存在空间相干性。根据中心极限定理可知,自然目标的光场服从于圆形复数高斯统计分布。根据复数高斯矩定理^[13]可知,不同位置光强涨落的相关度可表示为:

$$\begin{aligned} \langle I_A(t) I_B(t) \rangle &= \langle E_A(t) E_A^*(t) E_B(t) E_B^*(t) \rangle = \\ &= \langle E_A(t) E_A^*(t) \rangle \langle E_B(t) E_B^*(t) \rangle + \\ &= \langle E_A(t) E_B^*(t) \rangle \langle E_B(t) E_A^*(t) \rangle = \\ &= \langle I_A(t) \rangle \langle I_B(t) \rangle [1 + |\gamma_{AB}|^2], \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $|\gamma_{AB}|$ 为光场 $E_A(t)$ 与 $E_B(t)$ 的空间相干度, $I_A(t)$ 为 A 处探测获得的光强涨落, $\langle \rangle$ 表示在测量时间范围内取均值。根据 Van Cittert-Zernike 定理可知,非相干光源光场的空间相干度 γ 等于目标光强分布图像 $I(\xi, \eta)$ 对应的空间频谱,即:

$$\gamma(\Delta x, \Delta y) = \frac{e^{-j\varphi} \iint I(\xi, \eta) \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \xi + \Delta y \eta)\right] d\xi d\eta}{\iint I(\xi, \eta) d\xi d\eta}. \quad (2)$$

其中: λ 为观测波长, z 为目标平面到观测平面的距离, $\Delta x, \Delta y$ 为观测基线在 x 轴与 y 轴上的投影距离, φ 为由于光程差引起的相位因子。从式(2)可看出,若能获得目标的光场空间相干度 γ ,即可通过傅里叶逆变换获得目标的光强分布图像。

根据式(1)可知,目标光场空间度 γ 可通过不同位置光强随机涨落的相关度获得:

$$|\gamma_{AB}| = \sqrt{\frac{\langle I_A I_B \rangle}{\langle I_A \rangle \langle I_B \rangle}} - 1. \quad (3)$$

由式(3)可知,通过测量目标在多个位置上的光强涨落信息即可获得目标的空间频谱模值^[14],若能再获得目标的频谱相位,即可通过傅里叶逆变换获得目标的光强分布图像。在强度相干成像过程中,频谱相位的获取方法主要有相位恢复算法^[15]、前向模型估计算法和高阶相干测量方法等。目前,常用的迭代傅里叶相位恢复算法可根据目标图像的空间限制条件和测得的空间频谱模值对频谱相位进行恢复^[16],并获得目标图像。

2.2 强度相干成像质量分析

强度相干成像是一种干涉成像方法。此方法通过测量目标的空间频谱模值获得目标图像,成像分辨力与光强涨落观测阵列的最长基线成正比^[17]。由于强度相干成像过程中仅采集目标的光强涨落,不涉及光场相位信息,大气湍流和集光器镜面像差不会对成像结果产生较大影响;利用强度相干法测量目标的空间频谱模值时不需要获得不同位置光场的干涉条纹,无需保证不同光路的光程相等,极大降低了建造长基线光学干涉阵列的难度,利用该方法可较为简单地获得目标的高分辨力图像。

然而恒星目标和空间目标的亮度较低,利用高频探测器探测目标光强的随机涨落时,在每个探测周期内探测器仅能接收到几个光子,此时散粒噪声引起的光电流变化远大于光强自身涨落引起的光电流变化。由于不同探测器上的泊松噪声相互独立,泊松噪声不会在光强涨落相干度测量中引入偏差,但会引入较大的观测噪声,从而极大地降低了强度相干法测量的信噪比。在不存在暗电流噪声与背景光噪声的情况下,空间频谱模值

的探测信噪比为^[18]:

$$\text{SNR} = A\alpha\eta |\gamma|^2 \sqrt{\Delta f T / 2}, \quad (4)$$

其中: A 为探测器的集光面积, α 为探测器的量子效率, η 为目标的光谱密度, Δf 为光强探测器的探测频率, T 为观测时长。

为实现目标的强度相干成像, 通常采用扩大集光面口径和提高光强探测器的采样频率及量子效率的方法来提高目标空间频谱模值的探测信噪比。然而过大的集光面口径会引入部分的相关误差, 提高探测器的采样频率会导致测量结果对大气湍流及设备光程误差敏感, 降低成像质量。研究表明: 利用冗余基线阵列和复合计数方法改进强度相干成像可提高空间频谱模值的测量信噪比。对亮度更为微弱的高轨卫星成像时, 可采用地基激光对目标主动照明以提高目标单位光谱宽度内的亮度成像质量^[19]。

3 室内仿真实验

3.1 现有强度相干实验框架

现有的强度相干成像室内实验通常利用高频光电探测器实现, 由于强度相干法的成像视野与测量阵列的最短基线成反比, 若需在 1 m 距离上对直径 1 mm 的目标成像, 观测波长为 500 nm, 需保证探测器距离小于 0.5 mm。利用高频探测器进行室内强度相干实验时, 观测基线长度受探测器体积的限制, 难以满足最短基线条件。目前在实验中通常采用分光棱镜将目标光强进行分光, 在不同光路位置利用探测器探测光强涨落, 以获得较短的等效观测基线。观测设备如图 2 所示。高压汞灯发出光谱宽度较窄的自然热光, 通过小孔后对透射式目标进行照明。目标的透射光聚焦到分光棱镜上, 利用高频探测器分别采集目标的光强涨落, 再利用乘法器计算不同探测器输出光电流的相关度^[20]。实验过程中两个探测器与分光棱镜的距离相等, 横向移动某一个光强探测器位置, 使测量位置产生较小的空间位置 Δx , 计算光强涨落的相关度即可实现对目标空间频谱 $\gamma(\Delta x, 0)$ 的测量。

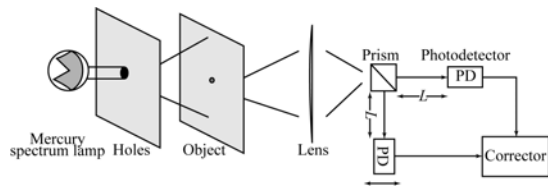


图 2 现有的强度相干成像实验框架

Fig. 2 Diagram of conventional intensity correlation imaging experiment

强度相干成像过程中, 需测量目标的多个空间频谱, 而利用上述实验系统每次仅能获得目标的单个空间频谱模值, 需移动光强探测器才能实现目标空间频谱模值的完整探测。为保证光强涨落相干性测量的准确度, 探测器的同步时间误差应小于采样周期的 1/40。由于热光光源的光谱密度 η 较低, 根据式(4)可知, 所测得的空间频谱模值的信噪比极低。此外, 实验系统中引入的分光棱镜会对目标光强产生折射与吸收, 从而影响测量结果, 不利于模拟真实的强度相干成像过程。

3.2 强度相干成像实验改进

针对现有强度相干成像系统的缺点, 本文改进了原有的强度相干成像法, 简化了强度相干成像过程并获得了更加接近真实的测量数据。利用改进的成像法可更为方便地控制强度相干成像中各系统的参数。实验方案如图 3 所示。

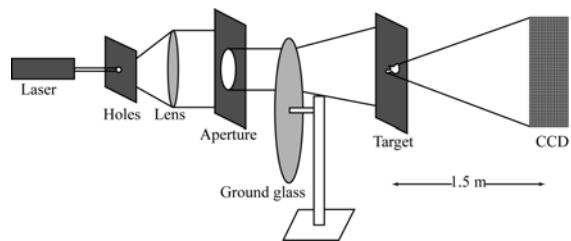


图 3 改进后的强度相干成像室内实验示意图

Fig. 3 Diagram of improved intensity correlation imaging experiment

激光通过小孔后衍射获得近似球面波, 经过凸透镜后准直为光强均匀的平面波, 利用光阑滤

除杂散光,此时获得的平面波具有较好的空间相干性与时间相干性。平面波照射到旋转的毛玻璃片上以消除光场空间相干性,此时获得光强涨落较慢的赝热光^[21]。毛玻璃片的散射光照射到待成像透射目标上,利用 CCD 代替高频光强探测器在远场探测目标的光强涨落。

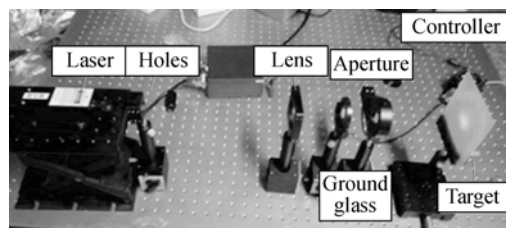
利用此成像系统采集光强涨落时,面阵 CCD 上的每个像素均相当于一个独立的光强探测器,连续采集目标的透射光强即可获得不同空间位置的光强涨落。通过计算不同位置光强涨落的相关度即可获得目标的空间频谱模值,而计算 CCD 阵列输出的光强涨落图像的自相关可测得目标完整的空间频谱模值。成像过程中无需移动探测器位置。由于 CCD 阵列上各像素间距通常小于 $10\ \mu\text{m}$,所以可实现对目标空间频谱的密集采样,获得较多的目标频谱模值以及较大的成像视野。在目标尺寸不变的情况下,增大强度相干视野能够提高相位恢复精度,获得质量更好的目标图像。

面阵 CCD 的最高采样频率约为 $1\ \text{kHz}$,而自然热光的光强涨落周期小于 $10^{-11}\ \text{s}$,利用 CCD 采集自然热光光强涨落的过程中,高频光强的随机涨落被平滑成直流信号,此时探测散粒噪声远大于探测获得的低频光强随机涨落,难以实现有效的强度相干成像。因此这里采用赝热光对目标进行照明,以提高强度相干的室内成像质量。赝热光光场不存在空间相干性,其光场统计分布同样服从复数高斯分布,光场的时间相关度与调制光场的旋转毛玻璃片的转速成正比,因此通过调节毛玻璃片转速即可获得光强涨落频率较低的模拟热光^[22]。当赝热光光强的随机涨落速率低于 CCD 采样频率时,利用 CCD 即可采集并获得目标的光强涨落,实现对目标的强度相干成像。由于赝热光的光谱密度 η 较高,CCD 测量获得的光强涨落受探测散粒噪声的影响较小,所以此种方法能够获得目标的高信噪比空间频谱模值。

3.3 强度相干实验

为验证以上实验方法的可行性,本文搭建了

室内强度相干成像的实验平台。实验采用 $532\ \text{nm}$ 激光光源和旋转毛玻璃片构成的赝热光源照射目标,目标为在金属板上镂空的直径为 $3\ \text{mm}$ 的卫星目标。在距离目标平面 $1.6\ \text{m}$ 的位置利用面阵 CCD 采集目标的透射光强涨落。赝热光源中旋转毛玻璃片的转速为 $0.3\ (^{\circ})/\text{s}$,光强随机涨落的频率约为 $20\ \text{Hz}$ 。利用 Hamamatsu 公司的 C11440-22CU 型面阵 CCD 连续采集光强涨落,其像素间最小距离为 $6.5\ \mu\text{m}$,阵列大小为 $2\ 048\times 2\ 048$ 。为减少 CCD 的本底噪声对测量结果的影响,需保证 CCD 采集到的光强较强且不存在光强饱和现象,因此将 CCD 采样时间设定为 $30\ \text{ms}$ 。图 4(a) 为赝热光源与被观测目标,图 4(b) 为对目标光强涨落进行观测的 CCD。



(a) 赝热光源与模拟目标

(a) Pseudothermal light sources and object



(b) 光强接收相机

(b) Intensity measurement camera

图 4 强度相干成像实验设备图

Fig. 4 Experiment installation of intensity correlation imaging

利用 CCD 连续采样目标的光强涨落,共获得 $1\ 024$ 帧目标光强涨落图像 $I_i(x, y)$,如图 5 所示。



图 5 采集实验数据

Fig. 5 Experiment data

3.4 数据处理

处理测量数据即可获得目标光强的分布图像,强度相干成像数据的处理方法如图 6 所示。

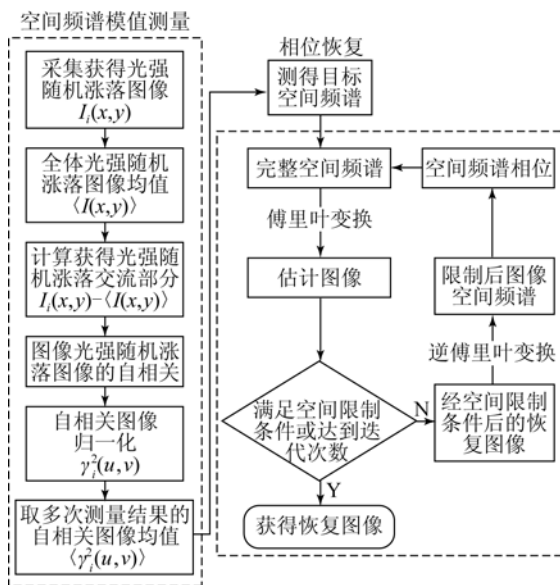


图 6 强度相干成像的数据处理流程

Fig. 6 Flow chart of data processing for intensity correlation imaging

根据强度相干成像的流程图可知,强度相干成像主要分为目标空间频谱的模值测量和相位恢复,其中空间频谱模值测量是强度相干成像的重点。

利用 CCD 采集获得目标的多幅光强随机涨落图像,根据测得的所有光强随机涨落图像,计算获得目标光强随机涨落图像的均值 $\langle I(x, y) \rangle$,光强随机涨落的交流部分为 $\Delta I_i(x, y) = I_i(x, y) -$

$\langle I(x, y) \rangle$ 。根据式(3)可知,目标频谱平面上 (u, v) 位置的空间频谱模值可表示为:

$$|\gamma_i(u, v)| = \sqrt{\frac{\Delta I_i(x, y) \Delta I_i(x+u, y+v)}{\langle I(x, y) \rangle \langle I(x+u, y+v) \rangle}} \quad (5)$$

根据上式可知,目标的空间频谱模值可表示为测得光强随机涨落图像的归一化自相关,目标空间功率谱的表达式为:

$$|\gamma_i(u, v)| = \sqrt{\frac{\Delta I_i(x, y) \otimes \Delta I_i(x, y)}{\langle I(x, y) \rangle \otimes \langle I(x, y) \rangle}} \quad (6)$$

其中: \otimes 表示相关运算。由于强度相干成像过程中对目标的光强涨落图像进行了多次采样,采集获得的光强随机涨落相互独立,利用不同光强涨落图像获得的目标空间功率谱 $|\gamma_i(u, v)|^2$ 中所含的噪声也相互独立。为提高探测信噪比,需计算多次测量结果均值作为最终的测量结果,目标空间频谱模值可表示为:

$$|\gamma(u, v)| = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\gamma_i(u, v)|^2} \quad (7)$$

目标的空间频谱相位恢复主要是通过迭代傅里叶变换法实现的。目标的光强分布恒为非负实数,在不存在背景光干扰的情况下,通常认为目标背景光强为零,由此可根据目标尺寸设置合适的图像空间限制条件。通过在空间域与频率域之间反复进行傅里叶变换,获得空间频谱模值与测量结果相近、图像范围满足空间限制条件的结果,实现了对目标的成像。

图 6(a)为目标的光强分布图像 $O_{\text{theory}}(x, y)$,目标的真实空间功率谱 $|\gamma_{\text{theory}}(u, v)|^2$ 如图 6(b) 所示,根据猜测的光强随机涨落计算获得的目标空间功率谱 $|\gamma_{\text{measure}}(u, v)|^2$ 如图 6(c) 所示,利用相位恢复方法恢复获得的目标光强分布图像 $O_{\text{measure}}(x, y)$ 如图 6(d) 所示。



(a) 真实光强分布图像

(a) Images of real intensity distribution

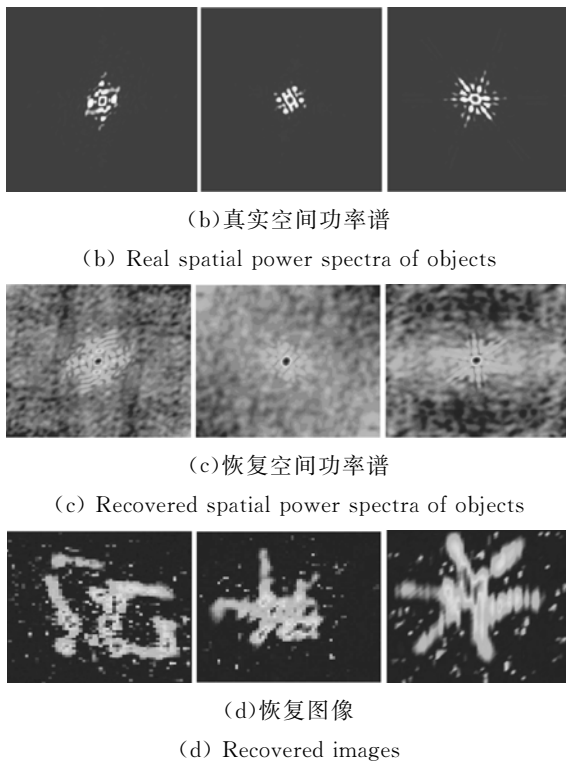


图 7 实验结果

Fig. 7 Experiment results

根据实验结果可知,利用本文设计的强度相干成像系统能够观测到明显的光强随机涨落,根据测得的光强随机涨落能够对目标光强分布图像进行恢复,并由此验证了此方法的可行性。但从成像结果可看出,恢复图像中仍含有较多噪声,会对成像质量产生一定的影响。

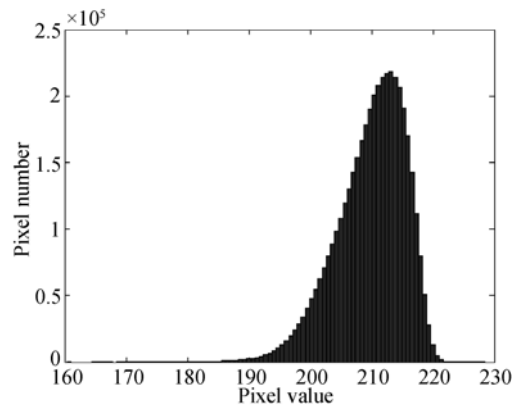
3.5 成像结果分析

强度相干过程中影响成像质量的主要因素为空间频谱模值的测量误差,此部分误差主要来源于强度相干系统噪声和探测暗电流噪声。

强度相干成像过程中目标空间频谱模值的测量是通过统计方法实现的。在不考虑 CCD 探测噪声的情况下,光强涨落的相关度服从于均值目标空间功率谱 $|\gamma|^2$ 、方差为 σ_0^2 的高斯分布。在成像过程中需取 N 次独立光强随机涨落相关度的均值作为测量结果,测量噪声大小为 σ_0/\sqrt{N} ,因此增加探测次数 N 可达到提高探测信噪比的目的,探测次数 N 与式(4)中的 ΔfT 等效。由于低频部分与高频部分的空间功率谱方差相等,但低频空间功率谱远大于高频空间功率谱,因此高频空间

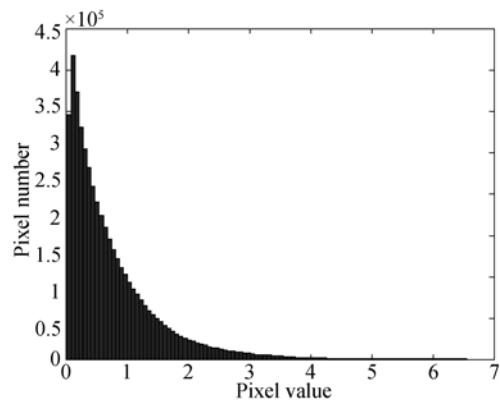
功率谱的测量信噪比远低于低频空间功率谱。

受 CCD 采样频率限制,实验过程中仅能探测获得热光的低频光强随机涨落,自然光的光强随机涨落被平滑成直流信号。然而,自然光会在测量结果中引入背景光噪声,同时 CCD 的暗电流噪声与读出噪声也会对测量结果产生影响。探测过程中的背景光噪声、读出噪声和散粒噪声共同构成 CCD 本底噪声。图 7(a)为 CCD 探测器本底噪声的输出图像直方图分布,图 7(b)为实际观测过程中获得的目标光强随机涨落图像的直方图分布。



(a) 本底噪声强度分布

(a) Intensity distribution of background noise



(b) 观测数据光强分布直方图

(b) Intensity distribution of measured data

图 8 采集数据分析

Fig. 8 Analysis of measured data

由图 8(a)可知,CCD 探测噪声强度近似服从高斯分布,噪声均值为 209。由图 8(b)可知,受探测器噪声的影响,探测获得的目标光强涨落在暗

弱光强部分不再符合负指数分布。此时光强随机涨落的交流部分 ΔI_{real} 可近似表示为:

$$\Delta I_{\text{real}} = \Delta I_{\text{theory}} + N(0, \sigma_1^2). \quad (7)$$

CCD 本底噪声会在探测光强中引入不存在空间相干性的额外光强涨落。此部分光强涨落噪声降低了目标空间功率谱 $|\gamma_{\text{measure}}(u, v)|^2$ 的探测信噪比。通过增加光强涨落的测量次数可降低 CCD 本底引起的空间功率谱探测噪声。

图 9 表示了采用 4, 32, 128, 1 024 幅光强涨落图像计算获得的目标空间功率谱, 横坐标为归一化的空间频谱。根据图 9 可知强度相干测量噪声主要分布在高频部分, 测量噪声随测量次数的增大而明显减小。

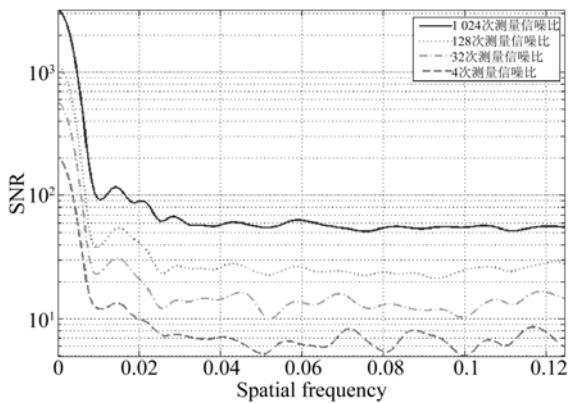


图 9 不同测量次数的强度相干测量信噪比

Fig. 9 Signal-to-Noise Ratios (SNRs) of intensity correlation imaging with different measurement times

除目标空间功率的测量噪声外, 空间频谱相位的恢复误差同样会对图像恢复质量产生较大影响。利用迭代傅里叶变换法进行频谱相位恢复的过程中, 选取合理的空间限制条件对目标光强分布区域进行限制, 可获得较精确的频谱相位, 空间限制条件越接近于真实的光强分布边界, 相位恢复越准确, 而强度相干成像中空间限制条件可通过目标先验信息或目标的自相关图像获得。然而当测得的空间频谱模值含有较大噪声时, 恢复获得的光强分布图像不再符合原有的空间限制条件, 若继续采用原有的空间限制条件恢复目标光强分布图像, 会产生较多的过拟合噪声, 降低图像质量。图 7 恢复图像上额外的条纹与斑点即为图

像恢复过程中的过拟合噪声。通过提高空间频谱模值的测量信噪比和改进相位恢复方法可减小过拟合噪声。在空间频谱模值的测量信噪比分别为 3, 5, 20 的情况下进行了相位恢复实验, 结果如图 10 所示。由恢复图像可看出, 在测量信噪比大于 20 的情况下, 利用现有的迭代傅里叶变换相位恢复算法可获得较好的恢复图像。

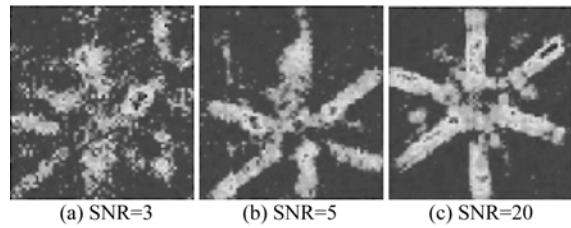


图 10 恢复图像结果

Fig. 10 Recovered images

在实际的强度相干成像过程中, 提高空间频谱模值的测量信噪比难度较大, 改进相位恢复方法能够更为方便地提高强度相干成像质量。根据强度相干成像噪声的分布特点及待成像目标的先验信息对相位恢复方法进行改进可极大地提高强度相干成像质量, 并获得接近于成像分辨力衍射极限的图像。

4 结 论

针对原有强度相干模拟实验成像过程复杂, 测量信噪比低, 成像过程中探测基线配置复杂等缺点, 本文设计了一种新的强度相干室内模拟观测方法。该方法在实际观测中能够较为简单地实现光强随机涨落频率、探测基线的调节, 获得接近于真实的观测数据, 为未来针对恒星及空间目标的强度相干成像系统提供参考。根据改进的实验方法进行了强度相干成像室内实验。实验结果表明, 该方法易于实现目标的强度相干成像, 验证了此方法的可行性。由于强度相干成像过程中的测量噪声主要分布在高频空间频谱部分, 因此增加观测次数可提高探测信噪比。

在空间频谱模值的信噪比低于3时,利用现有的相位恢复方法难以恢复目标图像,而在空间频谱模值的测量信噪比大于20时,现有的相位恢复算法可获得较好的目标图像。若能根据噪声的

分布特点及目标图像分布的先验信息改进相位恢复方法,能够进一步提高强度相干成像质量,后续将针对面向强度相干方法的相位恢复方法展开研究。

参考文献:

- [1] WESSELS R L, VAUGHAN R G, PATRICK M R, *et al.*. High-resolution satellite and airborne thermal infrared imaging of precursory unrest and 2009 eruption at Redoubt Volcano, Alaska [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013,259:248-269.
- [2] 邓健, 张伟, 龙夫年. 大口径拼接式合成孔径光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2008,16(1):29-34.
- [3] DENG J, ZHANG W, LONG F N. Optical design of large aperture segmented mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):29-34. (in Chinese)
- [4] QUIRRENBACH A. Optical interferometry [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2001, 39(1): 353-401.
- [5] 于树海, 王建立, 董磊, 等. 基于全相位谱分析的傅里叶望远术目标重构 [J]. *光学精密工程*, 2012,20(10):2275-2282.
- [6] YU SH H, WANG J L, DONG L, *et al.*. Field experiment data processing of Fourier telescope based on phase spectrum analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(10):2275-2282. (in Chinese)
- [7] 董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现 [J]. *光学精密工程*, 2008,16(6):999-1002.
- [8] DONG L, LIU X Y, WANG J L. Realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):999-1002. (in Chinese)
- [9] DRAVINS D, LEBOHEC S, JENSEN H, *et al.*. Optical intensity interferometry with the Cherenkov telescope array [J]. *Astroparticle Physics*, 2013, 43:331-347.
- [10] STREKALOV D V, ERKMEN B I, YU N. Intensity interferometry for observation of dark objects [J]. *Physical Review A*, 2013,88(5):53837.
- [11] HANBURY B R, DAVIS J, ALLEN L R. The angular diameters of 32 stars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1974, 167: 121-136.
- [12] III T, EDWARD R. *Phase Retrieval with Application to Intensity Correlation Interferometers* [D]. Salt Lake City: Texas A&M University, 2012.
- [13] HUSSEIN I I, SCHEERES D J, HYLAND D C. Interferometric observatories in earth orbit [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004,27(2):297-300.
- [14] NUNEZ P D, HOLMES R, KIEDA D, *et al.*. High angular resolution imaging with stellar intensity interferometry using air Cherenkov telescope arrays [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012,419(1):172-183.
- [15] BATES R. Contributions to the theory of intensity interferometry [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1969,142:413.
- [16] GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. California:Joseph W. Publication, 2007.
- [17] 于树海, 王建立, 董磊, 等. 基于非均匀周期采样的傅里叶望远镜时域信号采集方法 [J]. *中国光学*, 2013,6(3):395-401.
- [18] YU SH H, WANG J L, DONG L, *et al.*. Time region signal collecting method of Fourier telescope based on non-uniform periodically sampling [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(3):395-401. (in Chinese)
- [19] 王斌, 汪宗洋, 吴元昊, 等. 利用多通道相位差异波前探测法检测自适应光学系统非共光路像差 [J]. *光学精密工程*, 2013,21(7):1683-1692.
- [20] WANG B, WANG Z Y, WU Y H, *et al.*. Calibration of no-common path aberration in AO system using multi-channel phase diversity wave-front sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(7):

- 1683-1692. (in Chinese)
- [16] LANE R G. Phase retrieval using conjugate gradient minimization [J]. *Journal of Modern Optics*, 1991, 38(9): 1797-1813.
- [17] 卫沛锋, 刘欣悦, 林旭东, 等. 自适应光学系统校正后实际分辨率评价指标 [J]. *中国光学*, 2014 (4): 672-678.
- WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al.*. Evaluation index of the actual resolution after correction of adaptive optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014 (4): 672-678. (in Chinese)
- [18] MALVIMAT V, WUCKNITZ O, SAHA P. Intensity interferometry with more than two detectors? [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 437(1): 798-803.
- [19] DRAVINS D, LEBOHEC S, JENSEN H, *et al.*. Optical intensity interferometry with the Cherenkov telescope array [J]. *Astroparticle Physics*, 2013, 43: 331-347.
- [20] SATO T, SASAKI K, ANDO K. Adaptive techniques for precise detection of the coherence function by an intensity triple correlator [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(12): 2055-2059.
- [21] ZHANG D, TANG Q, WU T, *et al.*. Lensless ghost imaging of a phase object with pseudo-thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(12): 121113.
- [22] BAJORSKI P. *Statistics for Imaging, Optics, and Photonics* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

作者简介:



高 昕(1973—),男,天津人,博士,高级工程师,博士生导师,1998 年于西北工业大学获得硕士学位,2007 年于中国科学院光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光学测控设备总体与空间目标高分辨力成像技术的研究。
E-mail: gaoxin526@sina.com



李希宇(1990—),男,山东青岛人,硕士研究生,2008 年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事面向高轨目标的强度相干成像技术的研究。E-mail: lixiyu19900910@163.com

(本栏目编辑:曹 金)

(版权所有 未经许可 不得转载)