

基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量

谈志杰¹, 尹少齐¹, 喻虹^{1,2*}, 陆荣华¹, 韩申生^{1,2}¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;²国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 强度关联干涉测量利用光场的高阶关联特性获取星体空间角度信息, 有望实现脉冲星角位置的高精度测量。然而常规的强度关联测量需要满足相干探测条件, 这对探测器的时间分辨提出了极高的要求。提出基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量方法, 在探测器前放置调制屏以对光场进行空间调制, 通过旋转调制屏获取二阶干涉条纹。理论推导了当两条光路的调制屏存在角度差时二阶关联函数的表达式, 并基于理论推导结果设计双反射镜实验方案并进行相关可见光实验验证, 所得实验结果与理论分析结果相符。该方法大幅降低了探测器的时间分辨要求, 对于我国未来实现航天器的自主导航具有重要意义。

关键词 测量; 干涉测量; 强度关联; X 射线

中图分类号 O434.19

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0712005

Intensity Correlation Interferometry for Astral Observation Angle Based on Spatial Modulation

Tan Zhijie¹, Ying Shaoqi¹, Yu Hong^{1,2*}, Lu Ronghua¹, Han Shensheng^{1,2}¹Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310024, China

Abstract Intensity correlation interferometry, which exploits the high-order correlation characteristics of optical fields to obtain the spatial angles of astral bodies, is expected to achieve high-precision measurement of angular positions of pulsars. However, conventional intensity correlation measurement requires coherent detection, which imposes an extremely high requirement on the temporal resolution of detectors. In this paper, intensity correlation interferometry for astral observation angle based on spatial modulation is proposed. The optical field is spatially modulated by a modulation screen located in front of the detector, and the modulator screen is rotated to obtain second-order interference fringes. A second-order correlation function is derived theoretically for the case when there is an angle difference between the screen modulators of the two optical paths. On the basis of the theoretical results, a two-mirror experimental scheme is designed to verify the results obtained by visible light experiments. The experimental results are consistent with the theoretical analysis results. This method, greatly reducing the temporal resolution requirement on detectors, is significant for China's fulfillment of spacecraft autonomous navigation in the future.

Key words measurement; interferometry; intensity correlation; X-ray

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-10-13; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503303)、国家自然科学基金(11627811)

通信作者: *yuhong@siom.ac.cn

1 引言

脉冲星是一种高速自转的中子星,可以周期性地向外辐射电磁脉冲信号,被誉为宇宙中的“灯塔”^[1-3],用于对脉冲信号进行高精度测量,基于脉冲星还有可能建立米级定轨精度的星体导航网络^[4]。目前获取脉冲星角位置的主要方法是甚长基线干涉测量(VLBI)^[5],其主要原理是利用地球表面相距大于 1000 km 的多台射电望远镜接收同一颗脉冲星的辐射信号,计算出时间延迟,再进行干涉测量^[6]。受限于基线长度以及探测信号波长,目前探测精度为毫角秒量级,但建立定轨精度为 10 m 的自主导航系统要求脉冲星角位置测量精度达到微角秒量级^[4]。2004 年 Sala Álvarez 等^[7]提出了基于 X 射线的自主导航定位,使用波长极短的 X 射线进行星体探测理论上可以获得更高的测量精度^[8]。然而,对于 X 射线系统而言,若采用常规的一阶干涉测量方式,需要加工大口径光学器件且精度达到纳米量级,这在工程上存在较大的困难。

考虑到脉冲星辐射是热光场,具有随机涨落的特性,因此可以利用光场的高阶关联特性来获取脉冲星的空间角度信息。人们对光场的高阶关联特性的研究起源于 1956 年的 HBT 实验^[9-10],该实验打开了量子光学的大门。近年来,基于光场高阶关联的强度关联测量技术已经广泛运用于光学成像^[11-13]和 X 射线领域^[14-17],将 X 射线强度关联技术与脉冲星观测相结合的研究也取得了一些进展^[18-19]。强度关联干涉测量不直接测量光场相位,而是测量光场

强度涨落,因此不要求光学器件达到波长量级的制造精度,从而大大降低工程上的难度,并且这类测量方法还可以在在一定程度上克服环境噪声的影响。但是,常规的强度关联干涉测量要求满足相干探测条件,对探测器的时间分辨率要求较高,对于脉冲星 X 射线探测的时间分辨率需要达到 ps 量级,并且需要大量的时间采样,测量时间较长^[20-22]。

本文提出了基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量方法,利用探测器前置调制屏对光场进行空间调制,通过旋转调制屏,计算两条光路的光场强度关联函数,获取二阶干涉条纹,进而得到星体的空间角度信息。首先从理论上推导了两条光路的调制屏存在角度差的情况下二阶关联函数的表达式,然后设计实验进行验证,并且分析了调制屏尺寸对测量精度的影响。最后结合脉冲星观测提出基于双反射镜的观测张角强度关联干涉测量实验方案,进行了相关的可见光实验验证。

2 理论模型

基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量模型如图 1 所示。脉冲星发出两束光:一束照射到调制屏 1 后由单像素探测器 D_A 记录,为光路 A;另一束照射到调制屏 2 后由单像素探测器 D_B 记录,为光路 B。两束光的夹角为待测的星体观测张角 $\Delta\xi$ 。调制屏 1 到单像素探测器 D_A 的距离为 z_1 ,调制屏 2 到单像素探测器 D_B 的距离为 z_2 ,且满足 $z_1 = z_2 = z_0$ 。调制屏 1 和调制屏 2 具有相同的空间结构,且两块调制屏在初始位置相互平行。

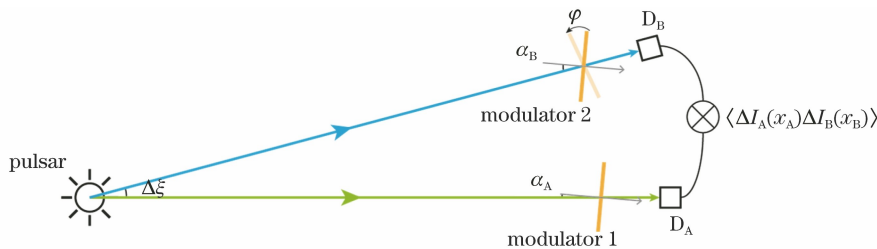


图 1 基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intensity correlation interferometry for astral observation angle based on spatial modulation

由于传播距离较远,脉冲星发出的光照射到调制屏上后可以视为空间相干光,其光强分布满足高斯分布^[23],入射到调制屏上的光场复振幅 E_0 可以表示为

$$E_0(u, \alpha_k) = \exp\left(-\frac{u^2}{2a^2}\right) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} u \sin \alpha_k\right), \quad k = A, B, \quad (1)$$

式中: u 为调制屏面的位置; a 为光源直径; λ 为波长; α_A 和 α_B 分别为光路 A 和 B 中光束辐照调制屏

的初始入射角; θ 为角度差, $\theta = \alpha_A - \alpha_B$ 。

根据衍射传播公式,光路 A 和光路 B 中探测面的光强分布分别为

$$I_k(x_k, \alpha_k) = \left| \int E_0(u, \alpha_k) E_s(u) h(u, x_k) du \right|^2, \quad k = A, B, \quad (2)$$

式中: x_A 和 x_B 分别是探测器 D_A 和 D_B 的位置坐标; $E_s(u)$ 为调制屏的透过率函数; $h(u, x_k)$ 为调制

屏面到探测面的脉冲响应函数,在傍轴近似下可以表示为

$$h(u, x_k) \propto \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda z_0}(x_k - u)^2\right]. \quad (3)$$

假设调制屏的颗粒足够小且随机分布,则 $E_s(u)$ 满足圆复高斯分布,由高斯矩定理可知

$$\begin{aligned} \langle E_s(u_1)E_s^*(u'_1)E_s(u_2)E_s^*(u'_2) \rangle = \\ \delta(u_1, u'_1)\delta(u_2, u'_2) + \\ \delta(u_1, u'_2)\delta(u'_1, u_2), \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; $*$ 代表复共轭; $\langle \cdot \rangle$ 代表系综平均。此时对光路 A 和光路 B 的光强涨落进行关联运算,可得

$$\begin{aligned} \langle I_A(x_A)I_B(x_B) \rangle - \langle I_A(x_A) \rangle \langle I_B(x_B) \rangle = \\ \int E_0(u_1, \alpha_A)E_0^*(u_2, \alpha_A)E_0(u_1, \alpha_B)E_0^*(u_2, \alpha_B) \times \\ h(u_1, x_A)h^*(u_2, x_A)h(u_1, x_B)h^*(u_2, x_B)du_1du_2 \propto \\ \int \exp\left(-\frac{u_1^2 + u_2^2}{a^2}\right) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(\sin \alpha_A - \sin \alpha_B)(u_1 - u_2)\right] \times \\ \exp\left\{-\frac{j\pi}{\lambda z_0}[(x_A - u_1)^2 - (x_A - u_2)^2]\right\} \times \\ \exp\left\{-\frac{j\pi}{\lambda z_0}[(x_B - u_2)^2 - (x_B - u_1)^2]\right\} du_1 du_2 \propto \\ \exp\left\{-\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} \left[(\sin \alpha_A - \sin \alpha_B) + \frac{(x_A - x_B)}{z_0}\right]^2\right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $I_A(x_A)$ 为 A 光路光强; $I_B(x_B)$ 为 B 光路光强。考虑到在脉冲星观测张角测量中,辐射到调制屏的光经过远距离传输后与调制屏的夹角较小,即 α_A 和 α_B 极小,在该情况下有 $\sin \alpha_A - \sin \alpha_B = \theta$, 因此可以得到此时的二阶关联函数的表达式为

$$\begin{aligned} g^{(2)}(x_A, x_B, \theta) = \frac{\langle I_A(x_A)I_B(x_B) \rangle}{\langle I_A(x_A) \rangle \langle I_B(x_B) \rangle} = \\ 1 + \exp\left[-\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} \left(\theta + \frac{x_A - x_B}{z_0}\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (6)$$

从以上公式中可知,通过两路光场的强度关联计算可以获得星体空间角度信息,并且角度差 θ 的存在,会使得二阶干涉条纹的峰值位置移动。若探测器位置确定,在两个调制屏与入射光的夹角相同的情况下,即 $\theta=0$ 时,二阶关联函数可取得极大值。

图 1 中待测张角 $\Delta\xi$ 可以通过改变调制屏的旋转角度 φ 来得到。在测量时,保持光路 A 不变,通过旋转光路 B 中的调制屏改变光路 B 中光束辐照调制屏的入射角,从而改变两条光路的角度差。当调制屏旋转到两路光入射角相同时,角度差为 0,二阶关联函数取得极值。所以可通过旋转调制屏、计

算二阶关联函数并寻找极值的位置来获取脉冲星观测张角信息。

3 实验结果

3.1 实验装置

基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量需要两个调制屏的空间结构完全相同,在光学实验验证中可以采用旋转双反射镜的方案让两条光路的光照射到同一块调制屏,从而使得两条光路的调制屏具有完全相同的空间分布。基于双反射镜方案的观测张角强度关联干涉测量实验光路如图 2(a) 所示。光源发出的光通过可调光阑、再经过滤波片后到达分束器,分成两路,这两路光束用来模拟脉冲星发出的两束光,两束光的夹角就是待求观测张角 $\Delta\xi$ 。经过分束器后的直透光直接照射调制屏,为光路 A;而经过分束器后出射的另一束光经过两块反射镜后到达调制屏,为光路 B。实验中调制屏与一个针孔相贴合,通过更换不同大小的针孔,可以改变调制屏的尺寸。针孔和调制屏安装在旋转台上,旋转台的旋转精度为 0.03° 。实验中采用像素大小为 $6.5 \mu\text{m}$ 的 CCD 探测器(Dhyana 400BSI V2)记录调制屏后方的光强信息,CCD 与调制屏的距离为 7 mm。CCD 与调制屏固定在同一个旋转台上,在旋转的过程中其相对位置保持不变。

图 2(b) 是实验光路的几何关系图,其中 θ_{M1} 和 θ_{M2} 分别是反射镜 1 和反射镜 2 旋转的角度。由双反射镜的几何关系^[24]可以得到,待测观测张角与两条光路的角度差 θ 满足

$$\Delta\xi = 2|\theta_{M1} - \theta_{M2}| + \theta, \quad (7)$$

(7) 式中角度差 θ 可以通过旋转调制屏、计算二阶关联函数得到。

3.2 理论模型验证

通过上述理论推导,得到了二阶关联函数与单像素探测器位置、两条光路角度差的关系,即(6)式,实验中首先对该结果进行验证。采用 532 nm 的脉冲激光器作为光源,保持光路 A 不变,通过旋转和平移光路 B 中的两块反射镜,实现两条光路入射调制屏的角度差 θ 的改变。在本实验中,分束器发出的两束光夹角 $\Delta\xi = 90^\circ$ 。通过移动和旋转反射镜 1 和反射镜 2,使得两束光照射到针孔位置,记录下旋转角度 $\theta_{M1} = 114.24^\circ$ 和 $\theta_{M2} = 69.59^\circ$,根据(7)式的几何关系,可得到 θ 值为 0.70° 。实验中首先采用 CCD 探测器记录光强分布,图 3(a) 和 (b) 分别是光路 A 与光路 B 的探测面光强分布,所使用的调制屏

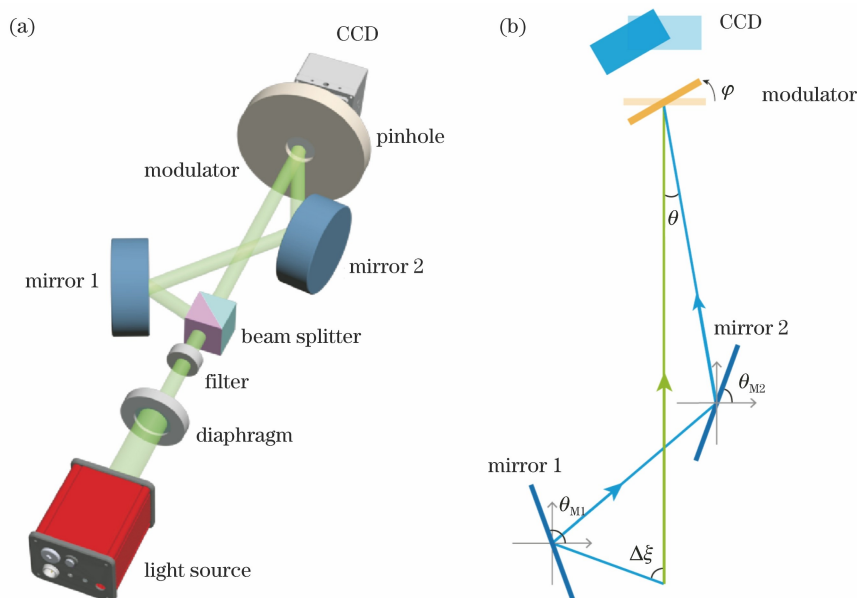


图 2 双反射镜观测张角强度关联干涉测量实验方案。(a)实验光路;(b)光路几何关系
 Fig. 2 Two-mirror experimental scheme of intensity correlation interferometry for observation angle.
 (a) Experimental optical path; (b) light path geometric relationship

尺寸(光源直径)为 $150 \mu\text{m}$ 。由于两路光入射角不同,图像存在细微的差别。图 3(c)是对两条光路中探测面光强涨落进行互关联运算后得到的二阶干涉结果,图 3(d)是图 3(c)的截面曲线与自关联计算结

果的对比。可以看出, $g^{(2)}$ 峰的位置产生了一定的偏移,偏移距离为 $84.5 \mu\text{m}$ 。根据(6)式,计算得到两路光入射调制屏的角度差为 0.69° ,这一测量结果与理论值一致。

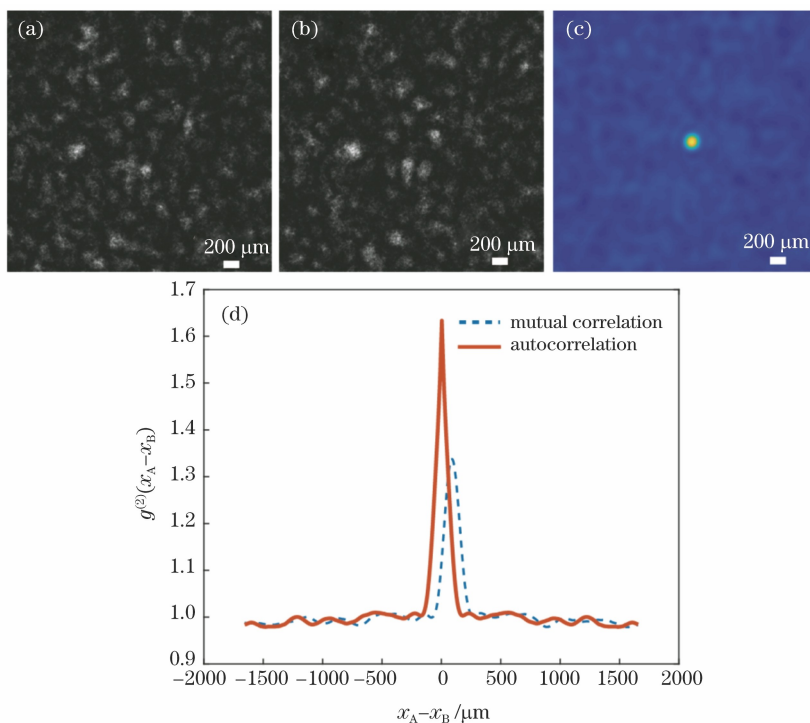


图 3 实验结果。(a)光路 A 探测面光强分布;(b)光路 B 探测面光强分布;(c)互关联计算结果;(d)互关联和自关联计算结果对比
 Fig. 3 Experimental results. (a) Intensity distribution on detector plane of optical path A; (b) intensity distribution on detector plane of optical path B; (c) calculation result of mutual correlation; (d) comparison of mutual correlation and autocorrelation calculation results

在两条光路均采用单像素探测器的情况下,使两个单像素位于各自光路中相同的位置,即 $x_A = x_B$ 。保持光路 A 不变,通过旋转和平移光路 B 中的两块反射镜可以实现两条光路的角度差 θ 的改变,当二阶关联函数 $g^{(2)}$ 取得极值时,所对应的角度差为 0° 。据此实验分析调制屏尺寸分别为 100, 150, 300 μm 时角度差 θ 对二阶干涉测量的影响,结果如图 4 中实线所示。为了便于与理论结果进行比较,对实验结果进行了归一化处理,使得 $g^{(2)}$ 的峰值为 2。从实验结果可以看出,调制屏的尺寸越小,二阶关联函数曲线的半峰全宽越大,这意味着能够测量的角度范围越大。图 4 中:调制屏尺寸为 100 μm 的情况下,角度差为 0.30° 左右时两条光路的二阶关联函数为 1.0;调制屏尺寸为 150 μm 的情况下,角度差为 0.20° 左右时两条光路的二阶关联函数降为 1.0,即失去关联;调制屏尺寸为 300 μm 的情况下,旋转角度在 0.12° 左右时两条光路的光强涨落就已经失去了关联。根据(6)式,可以得到如图 4 中虚线所示的理论结果,从图中可以看出实验结果与理论结果一致。因此,调制屏尺寸将会影响两条光路的关联角度范围,即调制屏尺寸越小,两条光路能够关联的角度范围越大,从而能够获得更多的测量点,提高测量精度。但是调制屏尺寸减小,调制屏上的颗粒尺寸也需相应减小,其加工精度要求也会随之提高,同时还会带来发散角的增大,导致单像素尺度上的光通量有所降低,所以在实际应用中二者需要平衡选择。

3.3 星体观测张角干涉测量

脉冲星为热光源,为更好地模拟脉冲星所发出

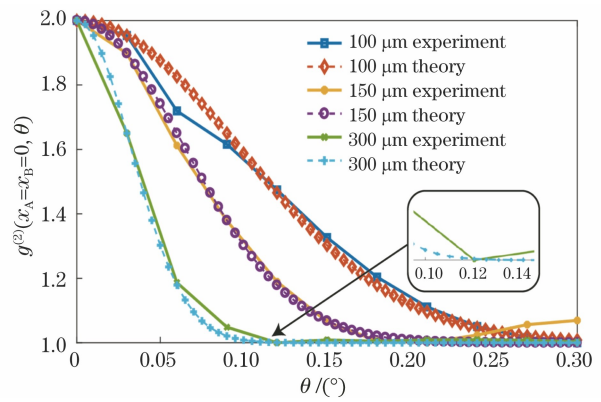


图 4 不同调制屏尺寸下旋转角度和二阶关联函数的关系
Fig. 4 Relationship between rotation angle and second-order correlation function under different modulator sizes

的非相干光,采用投影仪发出的真实热光作为光源进行星体观测张角强度关联干涉测量模拟实验。如图 2(a)所示,使用直径为 2 mm 的光阑对投影仪发出的光进行限束,采用的滤波片中心波长为 532 nm,光阑距离针孔的距离为 1.4 m,通过计算得到针孔处光场的横向相干尺度为 372.4 μm 。实验中采用的针孔大小为 300 μm ,小于横向相干尺度,因此光照射进针孔后可以近似看作空间相干光入射^[25]。实验中采用分束器将光束分为两束用于模拟脉冲星发出的两束光,两束光的夹角 $\Delta\xi = 90^\circ$ 。为了使得光路 A 与光路 B 能够照射到调制屏同一块区域,调整两个反射镜的旋转角度分别为 $\theta_{M1} = 113.13^\circ$ 和 $\theta_{M2} = 68.4^\circ$ 。图 5(a)和(b)给出了真热光情况下 CCD 上记录的光强分布,其中图 5(a)和(b)分别是光路 A 和光路 B 探测面的光强分布,由于角度差的

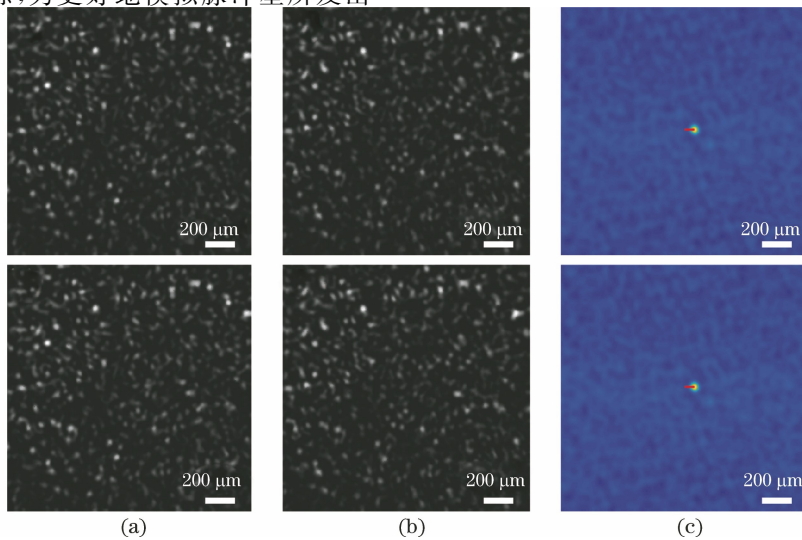


图 5 热光实验结果。(a)光路 A 探测面光强分布;(b)光路 B 探测面光强分布;(c)互关联计算结果
Fig. 5 Experimental results of thermal light. (a) Intensity distribution on detector plane of optical path A; (b) intensity distribution on detector plane of optical path B; (c) calculation result of mutual correlation

存在,光强分布存在一定的近似的平移变化。通过计算光路 A 与光路 B 之间的强度关联,得到二阶关联函数分布如图 5(c)所示,可以看出关联峰偏离了中心。通过计算关联峰的偏移($65 \mu\text{m}$),可以得到两路光入射调制屏的角度差为 0.53° 。根据(7)式,可以计算得到观测张角为 89.99° ,与真实值相符。

在脉冲星观测中通常采用的是单光子探测器,它并不具备空间分辨能力,因此下面在两条光路均采用单像素数据进行测量,即 $x_A = x_B = 0$ 。在该情况下旋转光路 B 中的调制屏,记录不同旋转角度时光路 B 中探测到的光强涨落,并与光路 A 中探测到的光强涨落进行关联运算,可以得到一系列二阶关联值。对这些二阶关联数据进行曲线拟合,可以得到待测的星体观测张角,具体拟合公式为

$$g^{(2)}(x_A = x_B = 0, \varphi) = 1 + \exp\left[-\frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2}(\varphi - \theta)^2\right]. \quad (8)$$

旋转调制屏到二阶关联函数取得极值时,调制屏旋转的角度即两路光入射调制屏的初始角度差,实验结果如图 6 所示,通过拟合得到的角度差为 0.53° 。这个结果与前面采用面阵探测数据得到的结果相同。同样地,根据(7)式,可以计算得到观测张角为 89.99° ,这与真实值相符。

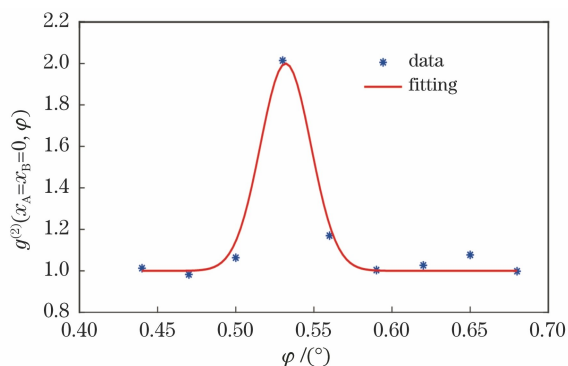


图 6 基于空间关联的观测张角强度关联干涉测量实验结果
Fig. 6 Experimental result of intensity correlation interferometry for observation angle based on spatial modulation

实际脉冲星角位置测量采用的是 X 射线,相比于可见光,其波长更短,能够实现更高的测量精度。

4 结 论

针对脉冲星角位置测量问题,提出了基于空间调制的强度关联干涉测量方法,该方法利用探测器前置调制屏对光场进行空间调制,通过旋转调制屏并计算两条光路之间的强度关联来实现星体观测张

角干涉测量。从理论上给出了当两路光入射到调制屏且存在角度差时光场的二阶关联函数表达式,若两条光路中采用的单像素探测器位于相对散射屏的位置,当二阶关联函数取得极值时,入射调制屏的两路光角度差为零。在理论推导的基础上进行了实验验证,分析了调制屏尺寸的影响,调制屏尺寸较小时可获得较大的角度测量范围,从而可提高测量精度。设计了基于双反射镜的空间调制强度关联干涉测量实验方案,完成了热光源的观测张角强度关联干涉测量实验验证。该方法可以避免常规强度关联测量对探测器时间分辨率的极高要求,为脉冲星角位置测量提供了新的思路,对未来实现航天器自主导航具有重要参考价值。

参 考 文 献

- [1] Arzoumanian Z, Nice D J, Taylor J H, et al. Timing behavior of 96 radio pulsars[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1994, 422: 671-680.
- [2] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source[M]// Lang K R, Gingerich O. A source book in astronomy and astrophysics, 1900-1975. Harvard: Harvard University Press, 1979: 498-504.
- [3] Burnell S J B, Bell J. Little green men, white dwarfs or pulsars?[J]. Annals of the New York Academy of Science, 1977, 302: 685-689.
- [4] Shuai P, Chen S L, Wu Y F, et al. Navigation principles using X-ray pulsars[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1538-1543.
帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X 射线脉冲星导航原理[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1538-1543.
- [5] Schuh H, Behrend D. VLBI: a fascinating technique for geodesy and astrometry[J]. Journal of Geodynamics, 2012, 61: 68-80.
- [6] Lu R S, Shen Z Q, Krichbaum T. Development and future prospects of millimeter-VLBI[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(7): 74-79.
路如森, 沈志强, Krichbaum T. 毫米波甚长基线干涉测量的发展与展望[J]. 科技导报, 2011, 29(7): 74-79.
- [7] Sala Álvarez J, Urruela Planas A, Villares Píera N J, et al. Feasibility Study for a Spacecraft Navigation System Relying on Pulsar Timing Information[EB/OL]. (2004-06-01)[2021-08-31]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/11514>.
- [8] Wang H M. NASA completes the world's first X-ray pulsar navigation space verification[J]. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(3): 277-278.
王海名. NASA 完成世界首次 X 射线脉冲星导航空

- 间验证[J]. 空间科学学报, 2018, 38(3): 277-278.
- [9] Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius[J]. Nature, 1956, 178(4541): 1046-1048.
- [10] Twiss R Q, Brown R H. The question of correlation between photons in coherent beams of light[J]. Nature, 1957, 179(4570): 1128-1129.
- [11] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Physical Review A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [12] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26133.
- [13] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. Optica, 2018, 5(4): 374-377.
- [14] Cheng J, Han S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 093903.
- [15] Yu H, Lu R H, Han S S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(11): 113901.
- [16] Tan Z, Yu H, Lu R, et al. Non-locally coded Fourier-transform ghost imaging[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2937-2948.
- [17] Tan Z J, Li Q Y, Yu H, et al. Progress on ghost imaging with X-ray and particles[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011008. 谈志杰, 李晴宇, 喻虹, 等. X 射线及粒子关联成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011008.
- [18] Su T, Li Y, Sheng L Z, et al. Angular position measurement of pulsars based on X-ray intensity correlation[J]. Optik, 2018, 161: 8-11.
- [19] Bei X M, Wu Y J, Huang L W, et al. A pulsar angular position measurement system and method based on dual satellite platform: CN103644907A[P]. 2014-03-19. 贝晓敏, 吴耀军, 黄良伟, 等. 一种基于双卫星平台的脉冲星角位置测量系统及方法: CN103644907A[P]. 2014-03-19.
- [20] Yang S C, Yu H, Lu R H, et al. Energy spectrum broadening correction in X-ray interferometry via intensity correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1034001. 杨善初, 喻虹, 陆荣华, 等. X 射线强度关联干涉测量能谱展宽校正[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1034001.
- [21] Fang H Y, Cong S P, Sun H F, et al. Ground verification system of X-ray pulsar navigation with multi-physical properties[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 089701. 方海燕, 丛少鹏, 孙海峰, 等. 具有多物理特性的 X 射线脉冲星导航地面验证系统[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 089701.
- [22] Wei Z, Lu R H, Yu H, et al. Research on intensity-correlated interferometry with ultra-weak light based on coincidence counting[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111013. 韦震, 陆荣华, 喻虹, 等. 基于符合计数的极弱光强度关联干涉测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111013.
- [23] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [24] Iizuka K. Engineering optics[M]. Heidelberg: Springer, 1985.
- [25] Tan Z J, Yu H, Lu R H, et al. Study on Fourier-transform ghost imaging with partially coherent X-Ray[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0411001. 谈志杰, 喻虹, 陆荣华, 等. 部分相干 X 光傅里叶变换鬼成像研究[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0411001.