

X 射线强度关联干涉测量能谱展宽校正

杨善初^{1,2}, 喻虹^{1*}, 陆荣华¹, 谈志杰^{1,2}, 韩申生¹

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 X 射线强度关联干涉测量为实现高分辨率脉冲星信息获取提供一条可行的技术途径,但现有的 X 射线探测器能量分辨率有限,探测到的 X 射线信号有一定能谱展宽,从而导致测量精度降低。为解决这一问题,基于不同能量相干曲线之间的缩放关系,提出一种强度关联干涉测量能谱展宽校正方法。通过仿真分析了校正前后的测量误差,探讨噪声对该校正方法的影响,并进行了可见光波段的模拟干涉测量实验,结果表明校正后的测量值与理论值相符,从而验证了该方法的有效性。

关键词 X 射线光学; 干涉测量; 强度关联; 能谱展宽

中图分类号 O434.19

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1034001

Energy Spectrum Broadening Correction in X-Ray Interferometry via Intensity Correlation

Yang Shanchu^{1,2}, Yu Hong^{1*}, Lu Ronghua¹, Tan Zhijie^{1,2}, Han Shensheng¹

¹ Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract X-ray intensity correlated interferometry provides a feasible technical way to realize high-resolution pulsar information acquisition. However, the energy resolution of existing X-ray detectors is limited, and the detected X-ray signals have spectrum broadening to some extent, which may result in measurement accuracy decrease. To solve this problem, a method is proposed to correct the spectrum broadening in intensity correlated interferometry based on the scaling relationship between the coherence curves at different energies. The measurement errors before and after modification are analyzed by simulation, and the influence of noise on the correction is discussed. A simulated interferometry experiment is carried out with the visible light. The results show that the measurement values after correction are consistent with the theoretical ones, thus the effectiveness of the method is validated.

Key words X-ray optics; interferometry; intensity correlation; spectrum broadening

OCIS codes 340.7450; 030.6600; 340.7480

1 引 言

1967 年,第一颗脉冲星被 Hewish 等发现^[1]。脉冲星信号具有极高的长期稳定性,可作为天然的时钟信号,在 20 世纪 70 年代就有学者提出用脉冲星进行导航的设想^[2]。与传统的导航方式相比,它具有定位精度高、抗干扰能力强、无需地面支持、全轨道自主导航等优点,在深空探测中具有不可替代的优势^[3]。要进行脉冲星导航,首先必须有适合导航的脉冲星星源,其位置精度要达到一定的要求,

10 m 量级的导航定位精度需要脉冲星的位置观测精度至少优于 0.1 mas^[4]。干涉法应用在星体观测中具有悠久的历史,星体干涉测量方法种类繁多,覆盖射电、可见光、红外、X 射线等多个窗口。1868 年 Fizeau^[5]首次提出用干涉法测量扩展源的角直径。1890 年 Michelson 等^[6]在美国 Lick 天文台的 30 cm 望远镜上安装了一个带有两个小孔的掩模,利用光干涉法首次成功测出木星 4 颗卫星的角直径。1921 年 Michelson 等^[7]在 Wilson 山的 2.5 m 反射望远镜上利用改进的干涉装置对参宿四(Betelgeuss)进

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-06-02; 录用日期: 2019-06-21

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

* E-mail: yuhong@siom.ac.cn

行测量,首次测出太阳以外恒星的角直径。1946年,Ryle等^[8]建立了第一个两单元天文观测射电干涉仪,标志着干涉测量技术在射电波段获得成功。1956年,Hanbury Brown等^[9]研制出第一台强度干涉仪,并用强度干涉仪测出了天狼星的角直径。20世纪50—60年代,变基线、多基元阵列天线的射电干涉测量仪相继被建立^[10]。20世纪70年代,甚长甚线干涉测量技术(VLBI)已经可把世界各地的望远镜连接起来,是目前分辨率最高的天文观测手段^[11]。然而在现有的脉冲星天文观测中,射电观测分辨率受制于波长,可见光频段分辨率受制于望远镜口径,难以进一步提高。考虑到X射线波长相比可见光要短数个量级,在X射线波段有望实现更高分辨率的脉冲星观测。

星体干涉仪从概念提出到现在已经发展了100多年,按干涉方式可以分为2类^[12-17]:一阶干涉和二阶干涉。一阶干涉是基于光场的一阶关联效应,通过测量光场的相位差来实现,通常是利用探测器直接记录光场的干涉条纹;而二阶干涉是基于光场的二阶关联特性,测量光场强度涨落,通过对探测器记录的信号进行相关处理得到干涉条纹。一阶干涉测量要求光学系统的加工精度达到波长量级,由于X射线波长极短,仅为nm量级,工程实现较为困难;而基于二阶干涉的X射线强度关联干涉测量,与光场的相位无关,对光学器件的加工精度没有苛刻的要求,并且可以克服环境噪声的影响,从而为实现更高分辨率脉冲星信息获取提供了一种可行的技术途径。然而,现有的X射线探测器能量分辨率有限,在脉冲星X射线强度关联干涉测量中接收到的X射线信号具有一定的能谱宽度,这使得相干曲线测量存在误差。

本文基于Hanbury Brown-Twiss(HBT)干涉测量原理,建立脉冲星X射线强度关联干涉测量模型,仿真分析X射线能谱宽度对干涉测量结果精度的影响,提出一种在已知X射线信号能谱分布的情况下校正二阶相干曲线能谱展宽的方法,分析宇宙背景噪声对该校正方法的影响,并且通过可见光波段的模拟实验对方法的有效性进行验证。

2 理论模型

基于HBT干涉测量原理的脉冲星X射线强度关联干涉测量方案如图1所示。脉冲星辐射出的X射线被两个卫星探测器接收,两个探测器分别记录辐射到探测器上的光场强度,当两个探测器距离近

时,它们的光场强度涨落是相关的,随着两个探测器之间距离 d 的增大,强度关联值越来越小,通过强度关联计算可获得相干曲线,从而获取星体角度信息。

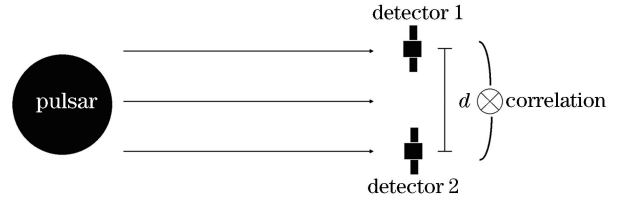


图1 脉冲星强度关联干涉测量原理图

Fig. 1 Schematic of pulsar interferometry via intensity correlation

将探测器1在空间位置 d_1 记录到的光场强度记为 $I_1(d_1)$,探测器2在空间位置 d_2 记录到的光场强度记为 $I_2(d_2)$,那么两个探测器探测到的光场强度关联值可表示为 $\bar{C}(d) = \langle I_1(d_1)I_2(d_2) \rangle, \langle \dots \rangle$ 表示系综平均。

根据HBT干涉测量原理,当入射光是单色光时,两个探测器距离为 d 时的强度关联值 $\bar{C}(d)$ 为^[18]

$$\bar{C}(d) = \Gamma^2(d, \lambda) \bar{C}(0), \quad (1)$$

式中, λ 为入射光的波长, $\bar{C}(0)$ 为两探测器距离为0时的强度关联值, $\Gamma^2(d, \lambda)$ 为二阶相干曲线,它是星体轮廓函数的傅里叶变换模方^[19]。天体轮廓一般为圆形,可以认为脉冲星的轮廓函数 $t(x)$ 为一个circle函数,因此脉冲星HBT测量的相干函数可以写为^[20]

$$\Gamma^2(d, \lambda) = \left[\frac{2J_1(\pi\theta d/\lambda)}{\pi\theta d/\lambda} \right]^2, \quad (2)$$

式中, θ 为要测量的脉冲星相对探测器的张角, J_1 为第一类一阶贝塞尔函数。通过拟合 $\Gamma^2(d, \lambda)$ 曲线,得到相干曲线下降到0时的基线长度,也就是待测的相干距离。

X射线波段往往用能量 E 来描述,能量与波长的换算关系为 $E = hc/\lambda$,其中 h 为普朗克常数, c 为光速,所以(2)式又可以写为

$$\Gamma^2(d, E) = \left[\frac{2J_1(\pi\theta dE/hc)}{\pi\theta dE/hc} \right]^2. \quad (3)$$

但是由于探测器能量分辨率有限,因此接收到的X射线并不是单一能量的,而是具有一定的能谱宽度,最后得到的 $\Gamma^2(d)$ 曲线将是多条相干曲线 $\Gamma^2(d, E)$ 的叠加^[19],即

$$\Gamma^2(d) = \int f(E) \Gamma^2(d, E) dE, \quad (4)$$

式中, $f(E)$ 为不同能量所占的权重, $\Gamma^2(d, E)$ 为能量为 E 的单一能量 X 射线强度关联得到的相干曲线。多条曲线的叠加最终使相干曲线模糊, 影响相干距离的测量精度。

实际探测中, 基线长度不是连续变化的, 计算多个基线长度 d 下两探测器的强度关联值, 得到离散的点序列, 假设基线每间隔距离 d_{unit} 计算一次关联值, 则有

$$\Gamma^2(nd_{\text{unit}}) = \int f(E)\Gamma^2(nd_{\text{unit}}, E)dE, \quad n=0, 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

式中, N 为最大基线长度与基线间隔 d_{unit} 的比值。假设 X 射线的中心能量为 E_0 , 那么能量 E_0 的相干曲线与能量 E 的相干曲线存在 E/E_0 倍的尺度变换关系, 可写为

$$\Gamma^2(nd_{\text{unit}}, E) = \Gamma^2\left(\frac{E_0}{E}nd_{\text{unit}}, E_0\right). \quad (6)$$

那么, 可将 $\Gamma^2(nd_{\text{unit}}, E)$ 用 $\Gamma^2(nd_{\text{unit}}, E_0)$ 作线性插值来近似表示, 即

$$\Gamma^2(nd_{\text{unit}}, E) = (1-p)\Gamma^2\left[\text{floor}\left(\frac{E_0}{E}n\right)d_{\text{unit}}, E_0\right] + p\Gamma^2\left\{\left[\text{floor}\left(\frac{E_0}{E}n\right)+1\right]d_{\text{unit}}, E_0\right\}, \quad (7)$$

式中, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整函数, $p = \frac{E_0}{E}n - \text{floor}\left(\frac{E_0}{E}n\right)$, 为 $\frac{\lambda_0}{\lambda}n$ 的小数部分。将 (7) 式代入到 (4) 式中, 得到

$$\Gamma^2(nd_{\text{unit}}) = \int f(E)\left\{(1-p)\Gamma^2\left[\text{floor}\left(\frac{E_0}{E}n\right)d_{\text{unit}}, E_0\right] + p\Gamma^2\left\{\left[\text{floor}\left(\frac{E_0}{E}n\right)+1\right]d_{\text{unit}}, E_0\right\}\right\}dE. \quad (8)$$

记向量 $\mathbf{d} = (0, d_{\text{unit}}, 2d_{\text{unit}}, 3d_{\text{unit}}, \dots, Nd_{\text{unit}})$, 将 (8) 式写为矩阵形式, 可以得到

$$\Gamma^2(\mathbf{d}) = \left[\int f(E)\mathbf{L}(E)dE\right]\Gamma^2(\mathbf{d}, E_0), \quad (9)$$

式中, \mathbf{L} 为与能量 E 有关的矩阵, 它的大小为 $N \times N$, 由 (8) 式可以得到它第 m 行、第 n 列的元素为

$$l_{mn} = \begin{cases} 1-p, & \text{floor}\left[\frac{E_0}{E}n\right] = m \\ p, & \text{floor}\left[\frac{E_0}{E}n\right] + 1 = m \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (10)$$

通过求解 (9) 式, 得到 $\Gamma^2(\mathbf{d}, E_0) = \left[\int f(E) \cdot \mathbf{L}(E)dE\right]^{-1}\Gamma^2(\mathbf{d})$, 就可以将能量 E_0 的相干曲线

$\Gamma^2(d, E_0)$ 从 $\Gamma^2(d)$ 曲线中提取出来, 从而得到精确的相干距离。

3 数值仿真

探测器的 X 射线能量分辨率有限, 接收到的 X 射线能谱有一定宽度, 使强度关联得到的相干曲线变形失真, 从而导致相干曲线的零点发生漂移, 使测量精度降低, 由此解算出的脉冲星位置会偏离实际值。本节通过脉冲星 X 射线强度关联干涉测量的仿真讨论 X 射线能谱宽度对相干距离测量的影响。

探测器接收到的 X 射线能谱中心能量取 1.24 keV, 能谱谱宽记为 ΔE , 脉冲星与探测器间的距离设为 $z = 1000$ 光年, 脉冲星的星体直径 $\rho = 10$ km。两探测器每隔距离 $\Delta d = 5$ km 计算一次强度关联值 $\bar{C}(d)$, 共计算 400 次, 两探测器间距离为 2000 km, 绘制相干曲线, 如图 2(a) 所示。图中, 实线是通过 1.24 keV 的单一能量 X 射线强度关联计算得到的相干曲线, 曲线的零点在 940 km 位置, 与理论上的相干距离 $hc z / \rho E = 946.1$ km 一致, 验证了仿真的可靠性。图 2(a) 中虚线是 X 射线相对能谱宽度 $\Delta E/E$ 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、1.0 时通过强度关联得到的相干曲线, 可以看出, 随着 X 射线能谱宽度增大, 相干曲线的零点与 1.24 keV 单一能量 X 射线对应的相干曲线零点越来越远, 此外随着谱宽增大相干曲线的可见度也越来越低。绘制了相干距离测量误差 δ 与相对能谱谱宽 $\Delta E/E$ 的关系图, 如图 2(b) 所示, 可以看出, 与单一能量 X 射线测得的相干距离相比, 通过具有一定能谱谱宽的 X 射线强度关联测量得到的相干距离偏离了实际值, 而且 X 射线能谱越宽, 相干距离的测量误差越大。

对零点漂移变形的相干曲线进行校正, 校正后的结果如图 3(a) 所示, 可以看出, 校正后的相干曲线与通过 1.24 keV 单一能量 X 射线强度关联得到的相干曲线几乎完全吻合。校正后的相干距离测量误差与相对谱宽的关系见图 3(b), 与校正前相比, 能谱谱宽引起的测量误差大大减小。

实际上, 宇宙环境中存在大量背景噪声, 当 X 射线探测器接收到光子时, 除了记录下信号光子, 还会记录下噪声光子, 探测噪声的存在可能会对校正的精度产生影响。将宇宙背景噪声以等光子数的高斯分布建模, 噪声量级定义为

$$\delta_{\text{noise}} = \sigma_{\text{noise}} / \mu_{\text{pulsar}}, \quad (11)$$

式中, μ_{pulsar} 指信号光子数的均值, σ_{noise} 指噪声光子数的标准差。以 X 射线中心能量为 1.24 keV, 探测器

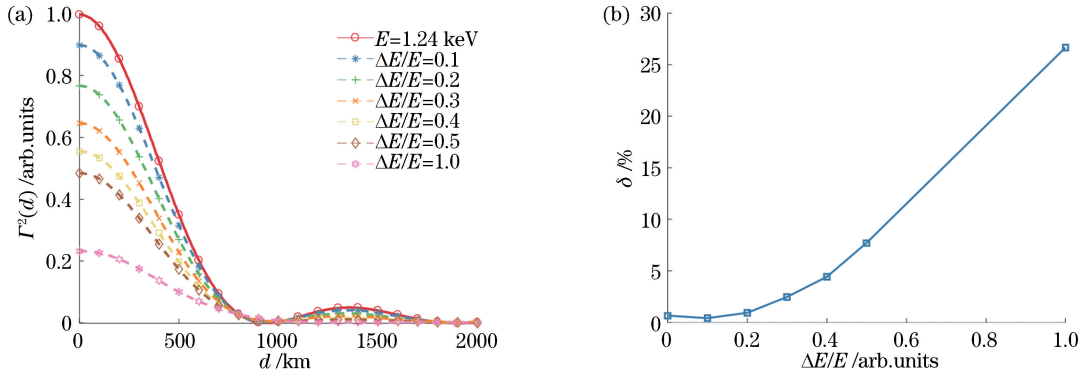


图 2 脉冲星 X 射线强度关联测量仿真结果。(a)强度关联计算得到的相干曲线;(b)相干距离测量误差与相对谱宽的关系
Fig. 2 Simulation results of intensity correlated measurement of pulsar X-ray source. (a) Coherence curves obtained by intensity correlation calculation; (b) relationship between the measurement error of coherent distance and the relative spectrum width

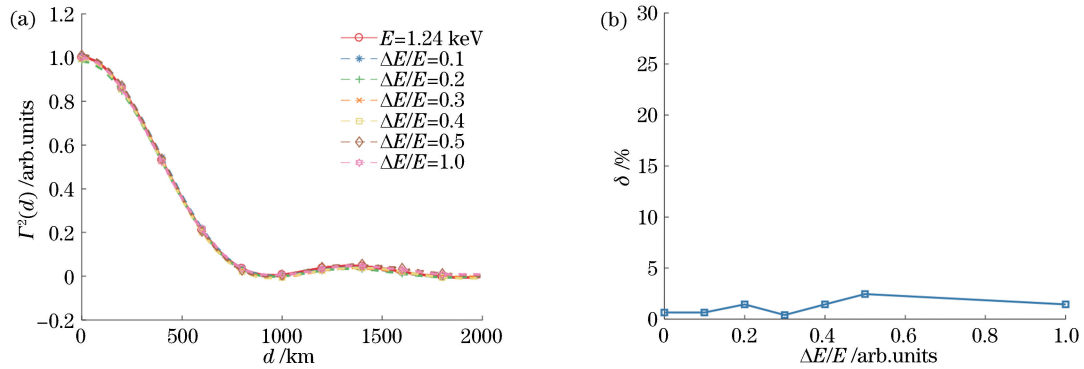


图 3 强度关联测量校正结果。(a)校正后的相干曲线;(b)校正后的相干距离测量误差与相对谱宽的关系
Fig. 3 Corrected results of intensity correlated measurement. (a) Corrected coherence curves; (b) relationship between the measurement error of coherent distance and the relative spectrum width after correction

接收 X 射线相对能谱宽度 $\Delta E/E = 0.4$ 的情形为例,分析 10%、100%、300%、500%量级的噪声对相干曲线校正的影响,结果如图 4 所示。图中,实线代表通过 1.24 keV 单一能量 X 射线强度关联得到的相干曲线,虚线代表通过相对能谱宽度 $\Delta E/E = 0.4$ 的 X 射线强度关联得到的相干曲线,点划线是校正后的相干曲线,可以看出噪声量级越高,校正后的相干曲线信噪比越差。

当噪声量级较高时,校正后的相干曲线信噪比会变得很差,难以直接读取零点,可用 Bessel 函数去拟合校正后的相干曲线,然后再读取相干曲线的零点。拟合结果如图 5 所示,图中实线是通过 1.24 keV 单一能量 X 射线强度关联得到的相干曲线,点划线是校正后的相干曲线,虚线是通过 Bessel 函数拟合得到的相干曲线,可以看出,噪声小的时候,能够得到比较精确的拟合,而噪声大的时候,拟合不精确。

分别计算不同 X 射线能谱宽度、不同量级的宇

宙噪声下校正后的相干距离测量误差,绘制相干距离测量误差与噪声量级关系曲线,如图 6 所示,可以看出,在噪声量级小于 200%的情况下,校正精度不会受到太大影响,大于 200%量级的噪声校正后的相干距离误差或大或小。这是因为当噪声量级比较大时,虽然由 X 射线谱宽引起的相干曲线变形仍能得到一定程度的校正,但是校正后的相干曲线的信噪比也会大大降低,使得相干曲线无法精准地拟合,导致相干距离测量的误差具有一定随机性。

4 实验结果

为验证方法的有效性,在可见光波段进行一个模拟实验,图 7 是模拟脉冲星强度关联测量的实验装置,实验中使用一盏投影仪内置的 150 W 高压汞灯,高压汞灯发出的光经过透镜汇聚在限孔 1,自由传播一段距离后再通过限孔 2 和旋转的毛玻璃产生非单色的赝热光场^[21-22],将其视为一个新的光源,来模拟脉冲星星体辐射。

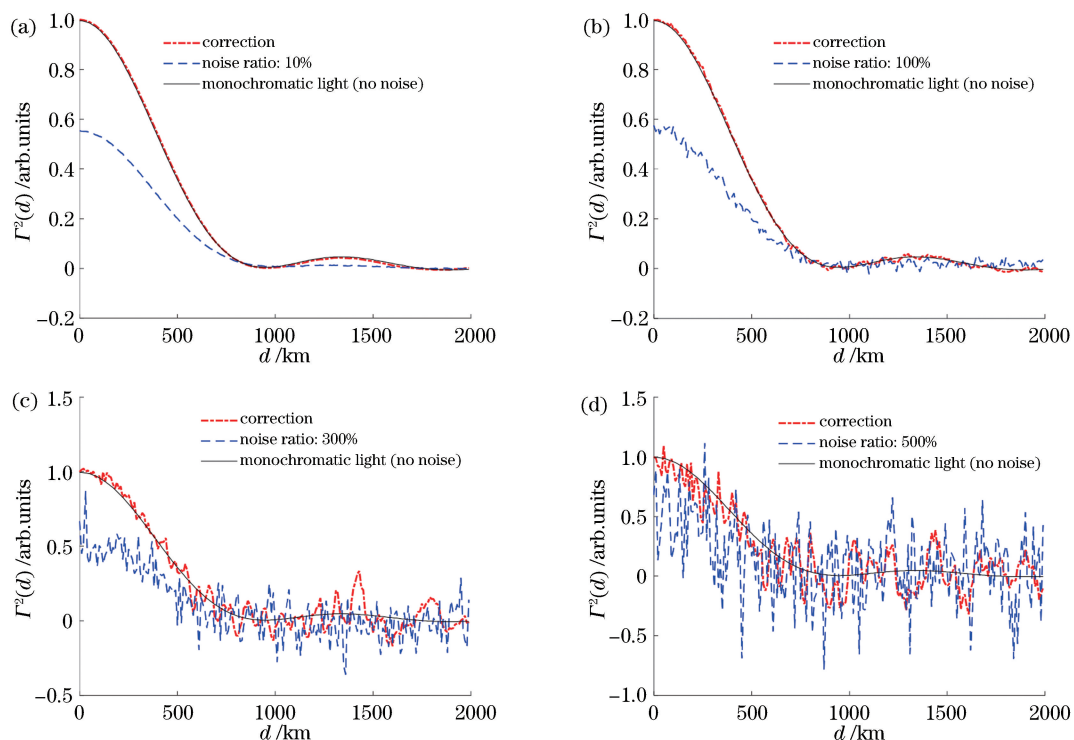


图 4 噪声环境下的相干曲线校正结果。(a)噪声量级 10%；(b)噪声量级 100%；(c)噪声量级 300%；
(d)噪声量级 500%

Fig. 4 Results of corrected coherence curves in noisy environment. (a) Noise ratio is 10% ; (b) noise ratio is 100% ;
(c) noise ratio is 300% ; (d) noise ratio is 500%

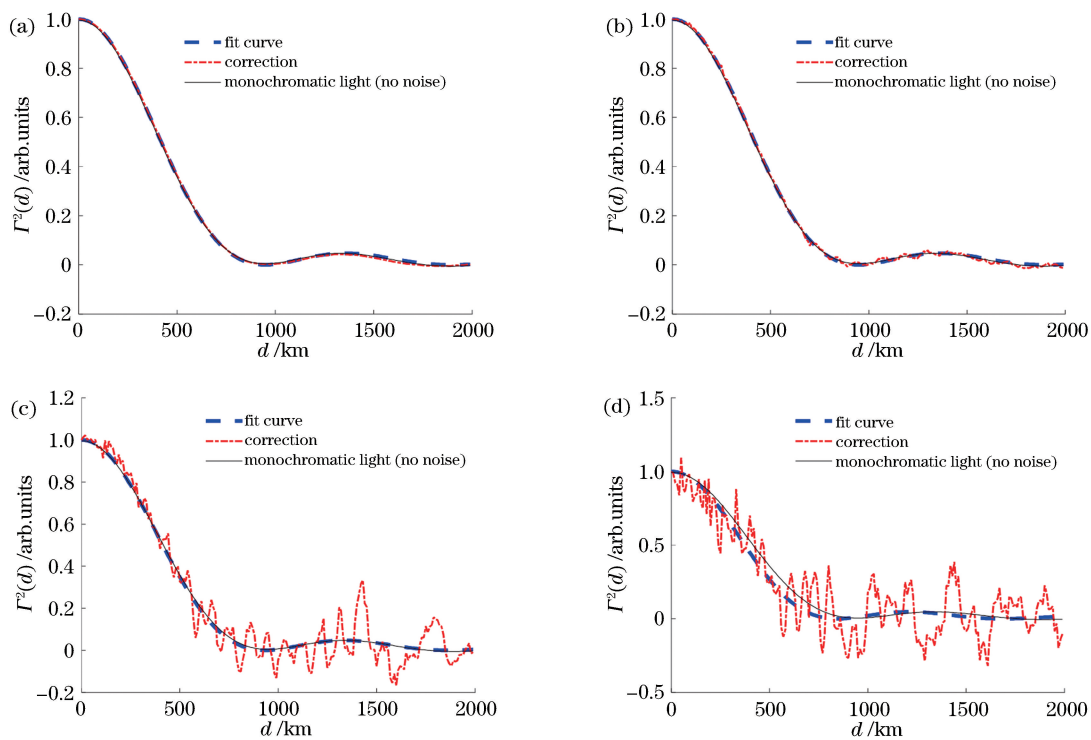


图 5 拟合后得到的相干曲线。(a)噪声量级 10%；(b)噪声量级 100%；(c)噪声量级 300%；(d)噪声量级 500%

Fig. 5 Coherence curves obtained by fitting. (a) Noise ratio is 10% ; (b) noise ratio is 100% ; (c) noise ratio is 300% ;
(d) noise ratio is 500%

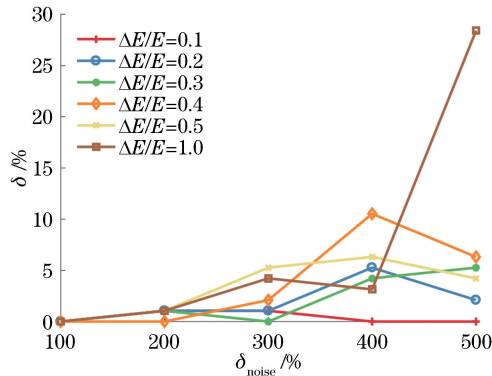


图 6 噪声量级对相干距离校正精度的影响

Fig. 6 Influence of noise ratio on the accuracy of coherence

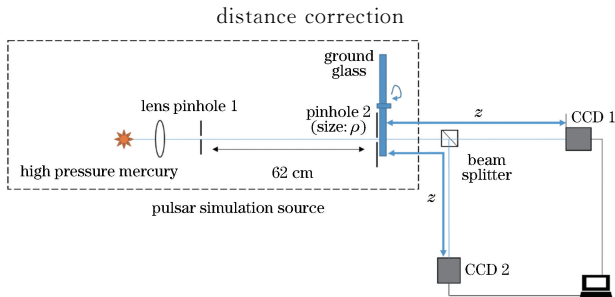


图 7 模拟脉冲星强度关联干涉测量实验装置

Fig. 7 Experiment setup of simulated pulsar interferometry via intensity correlation

在脉冲星辐射模拟中,用的高压汞灯光谱分布如图 8(a)所示,用来模拟具有一定能谱分布的脉冲星 X 射线辐射源,它在可见光波段辐射最强波长为 546.1 nm 的谱线,实验光路中没有加入滤光器件,因此 400~700 nm 波段的光将全部被探测器接收,从而模拟 X 射线探测器接收到具有能谱分布的 X 射线。当毛玻璃转动时,毛玻璃后表面的光场也将随之变化,以此来模拟脉冲星辐射的热 X 射线场随时间的涨落^[21]。用毛玻璃后表面到探测器的距离来模拟脉冲星到探测卫星的距离,用限孔 2 的孔径来模拟脉冲星的尺寸。

实验中,限孔 2 的直径 $\rho=1.2$ mm,毛玻璃后表面到探测器的距离 $z=42$ cm,通过转动毛玻璃模拟热光源随时间的变化,1000 次采样后进行两路探测信号的强度关联运算,得到的相干曲线如图 8(b)中的实线所示,图 8(b)中的虚线是相同条件下的数值仿真结果,实验结果与数值仿真结果基本符合。从曲线上读出可见度下降到 0 时,两探测器之间的距离为 $418.6 \mu\text{m}$,在汞灯光谱中波长 546.1 nm 左右的光占主要成分,对波长 546.1 nm 的单色光进行强度关联计算,得到的相干距离为 $232.8 \mu\text{m}$,假如把

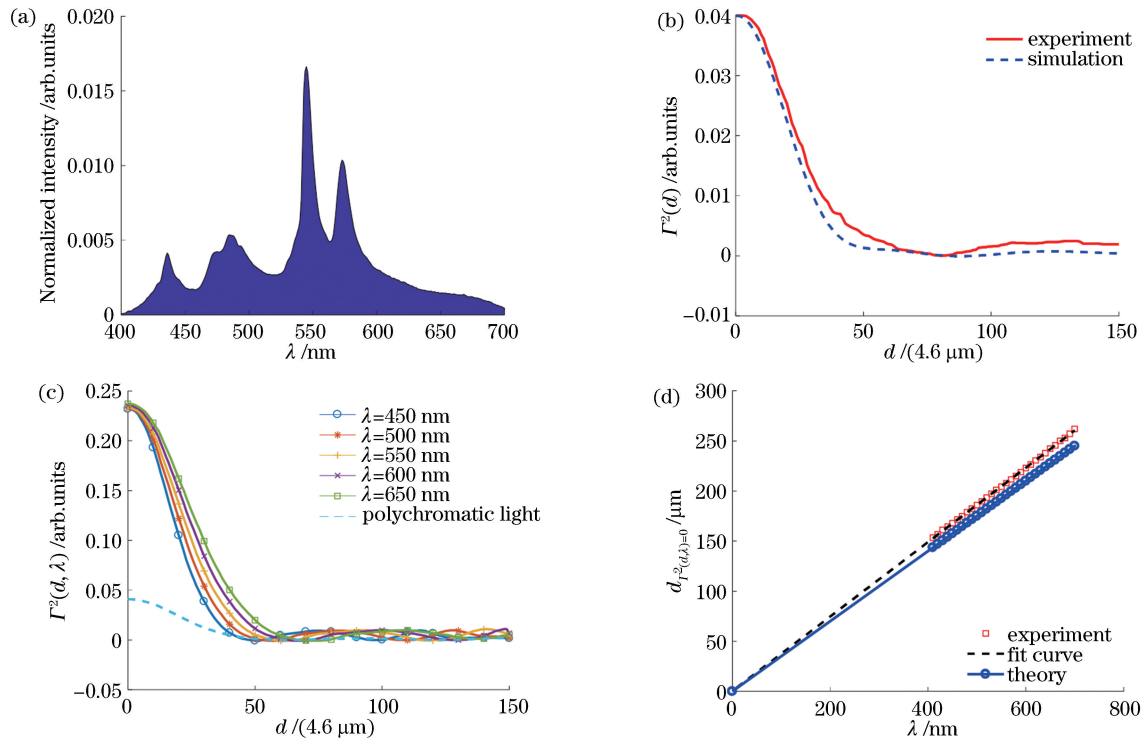


图 8 模拟脉冲星强度关联干涉测量实验结果。(a)模拟源光谱分布;(b)实验得到的相干曲线;(c)分离出的各波长相干曲线;(d)相干距离与波长关系

Fig. 8 Experiment results of simulated pulsar interferometry via intensity correlation. (a) Spectrum of the simulated source; (b) coherence curves obtained by experiment; (c) coherence curves separated in different wavelengths; (d) relationship between coherence distance and wavelength

非单色光相干曲线上的零点读数直接当作546.1 nm 单色光对应的相干距离,计算出的脉冲星位置将与实际值相差甚远。

由于实验中的光谱不是高斯线型,实际上很难说哪个波长是探测器接收信号的中心波长,所以将可见光波段 400~700 nm 按间隔 $\Delta\lambda = 10$ nm 离散为 30 个波长,将这 30 个波长对应的相干曲线都分离出来。图 8(c)为其中一部分分离出的 $I^2(d, \lambda)$, 从分离出的相干曲线读出强度关联值下降到 0 时的相干距离,绘制相干距离 $d_{I^2=0}$ 与波长 λ 关系曲线,如图 8(d)所示,图中的方形点是实验得到的各波长对应的相干距离,虚线是拟合实验结果得到的直线,实线是根据相干距离公式 $d_{I^2=0} = \lambda/\theta$ 计算出的理论值。从相干距离公式可看出,相干距离与波长成正比关系,且斜率为 θ 的倒数,图 8(d)中的拟合直线几乎经过原点,直线的斜率为 0.371,与斜率的理论值 $1/\theta = 0.35$ 基本一致,验证了本文校正方法的可靠性。

虽然实验结果与理论值基本符合,但是拟合直线的斜率与理论值仍有 6% 的误差,校正之后剩余的误差可能来源于限孔 2 的直径读数,因为限孔 2 使用的是一个可变光阑,它的调节精度 $\Delta\rho = 0.1$ mm,虽然限孔直径的读数是 1.2 mm,但限孔直径的真实值在 1.1~1.3 mm 之间,所以计算出的理论值和真实情况可能存在 $\Delta\rho/\rho = 0.1$ mm/1.2 mm = 8.33% 以内的偏差,从而导致校正后的测量值和理论计算结果之间存在部分差异。使用微电子工艺制造高精度限孔^[23-24],会得到更精确的实验结果,还可以进一步分析限孔直径、圆不确定度、陡直度等参数对实验结果的影响。

5 结 论

通过 X 射线强度关联干涉测量获取脉冲星位置信息时,探测到的 X 射线能谱具有一定宽度会降低相干距离测量的精度,进而影响脉冲星位置的测量精度。探测器接收到的 X 射线能谱越宽,相干距离的测量误差就越大。基于不同波长相干曲线之间的缩放关系可以校正强度关联干涉测量结果,从而降低能谱展宽带来的相干距离测量误差,在有宇宙噪声的环境下这一校正方法仍能工作,但是噪声过大的环境会降低校正的精度。本文通过在可见光波段实验验证了该方法的有效性,将促进 X 射线强度干涉在高精度脉冲星测量中的应用,对未来建立脉冲星导航系统有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, *et al.* Observation of a rapidly pulsating radio source[J]. Nature, 1968, 217(5130): 709-713.
- [2] Downs G S. Interplanetary navigation using pulsating radio sources[R]. United States: NASA, 1974.
- [3] Li L S, Mei Z W, Lü Z X, *et al.* Overview of the development of X-ray pulsar navigation detection technology [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(5): 1-9.
李连升, 梅志武, 吕政欣, 等. X 射线脉冲星导航探测技术发展综述[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 1-9.
- [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] Fizeau H. Ueber die ausdehnung starrer Körper. Zweite abhandlung [J]. Annalen der Physik, 1868, 211(11): 372-395.
- [6] Michelson A A. On the application of interference methods to spectroscopic measurements [J]. Astronomy and Astro-Physics (formerly The Sidereal Messenger), 1892, 11: 884-903.
- [7] Michelson A A, Pease F G. Measurement of the diameter of alpha-orionis by the interferometer [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1921, 7(5): 143-146.
- [8] Ryle M, Vonberg D D. Solar radiation on 175 Mc./s [M]//Sullivan W T. Classics in radio astronomy. Studies in the history of modern science. Dordrecht: Springer, 1946, 10: 184-187.
- [9] Hanbury Brown R, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius [J]. Nature, 1956, 178(4541): 1046-1048.
- [10] Qian S X. The history and development of aperture synthesis radio telescope at Cambridge, UK [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 1984, 3(2): 194-202.
钱善璿. 英国剑桥综合孔径射电望远镜发展的历史概况 [J]. 自然科学史研究, 1984, 3(2): 194-202.
- [11] Zhu X Y, Li C L, Zhang H B. A survey of VLBI technique for deep space exploration and trend in China current situation and development [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1893-1899.
朱新颖, 李春来, 张洪波. 深空探测 VLBI 技术综述及我国的现状和发展 [J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1893-1899.
- [12] Li C. Analysis of determining stellar position and

- ERP with the stellar interferometer(I): synopsis of all kinds of the interferometers [J]. Publications of Yunnan Observatory, 1987(1): 23-32.
- 李枕. 恒星光学干涉仪应用于测量恒星位置及 ERP 的分析(I): 各种干涉仪简介 [J]. 云南天文台台刊, 1987(1): 23-32.
- [13] Hecht E, Zajac A. Optics Addison-Wesley [J]. Reading, Mass, 1974, 19872: 350-351.
- [14] Brown R H. Measurement of stellar diameters [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1968, 6(1): 13-38.
- [15] Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images [J]. Astronomy and Astrophysics, 1970, 6: 85-87.
- [16] Currie D G, Knapp S L, Liewer K M. Four stellar-diameter measurements by a new technique: amplitude interferometry [J]. The Astrophysical Journal, 1974, 187: 131-134.
- [17] Stachnik R, Labeyrie A. Astronomy from satellite clusters [J]. Sky and Telescope, 1984, 67: 205-209.
- [18] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Interferometry of the intensity fluctuations in light. II. An experimental test of the theory for partially coherent light [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a Mathematical and Physical Sciences, 1958, 243 (1234): 291-319.
- [19] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Interferometry of the intensity fluctuations in light-I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a Mathematical and Physical Sciences, 1957, 242(1230): 300-324.
- [20] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Interferometry of the intensity fluctuations in light III. Applications to astronomy [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a Mathematical and Physical Sciences, 1958, 248(1253): 199-221.
- [21] Martienssen W, Spiller E. Coherence and fluctuations in light beams [J]. American Journal of Physics, 1964, 32(12): 919-926.
- [22] Parry G. Speckle patterns in partially coherent light [M]//Dainty J C. Laser speckle and related phenomena. Topics in applied physics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975, 9: 77-121.
- [23] Xie C Q, Zhu X L, Li H L, *et al.* Fabrication of X-ray diffractive optical elements for laser fusion applications [J]. Optical Engineering, 2013, 52(3): 033402.
- [24] Xie C Q, Zhu X L, Niu J B, *et al.* Micro-and nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.
- 谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.