

# 基于精密光程差调制的时域干涉信号闭合相位检测方法研究\*

唐琳琳<sup>1,2,3†</sup> 侯永辉<sup>1,2</sup> 魏 炜<sup>1,2,3</sup> 徐 腾<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 闭合相位法是实现长基线恒星光干涉高分辨成像的重要手段之一, 获得精确的闭合相位信息是进行光干涉图像重构的先决条件. 提出一种基于精密光程差调制的时域干涉信号闭合相位检测方法, 在3路干涉臂上进行非冗余精密光程调制, 并通过多次干涉测量结合数据拟合的方法消除光程差调制中存在的正弦误差, 使得光程调制的精度达到20 nm以内. 引入高速探测器提升时域干涉信号的采样频率, 对探测器上获得的时域干涉信号进行傅立叶变换处理, 获得3路干涉臂精确的闭合相位信息. 室内实验结果表明, 基于精密光程调制的时域信号闭合相位计算精度可以达到1/50波长以内.

**关键词** 仪器: 探测器, 技术: 干涉测量, 闭合相位, 光程差调制

中图分类号: P164; 文献标识码: A

## 1 引言

长基线光干涉高分辨成像技术可以在地基为天文学家提供毫角秒甚至亚毫角秒的观测精度, 为揭示恒星的形成及演化机理、探索活动星系核内部细节结构、分辨密近双星系统物质流等前沿天文科学研究提供有力的技术支撑. 在光学/红外波段实现高分辨干涉成像, 必须要克服地球大气对干涉条纹相位的随机扰动, 获得天体目标真实相位信息. Jennison<sup>[1]</sup>首先提出了闭合相位<sup>[2]</sup>技术, 即3条基线可以构成一个闭合环, 测量出这个闭合环的相位值, 由大气扰动、仪器机械振动、环境扰动引起的相位误差将互相抵消<sup>[3]</sup>, 通过数据处理单条基线上的真实相位信息将可以通过闭合相位进行求解. 闭合相位技术首先在射电波段望远镜阵中获得极大的成功. Rogstad<sup>[4]</sup>提出将闭合相位技术应用于光学波段, Rhodes和Goodman进行了相关实验<sup>[5]</sup>. Baldwin等<sup>[6]</sup>在单个望远镜上利用模板进行了闭合相位实验.

由于长基线光干涉普遍采用瞳面合束的方式, 要获得闭合相位信息需要在3条干涉臂上加载非冗余光程差调制信号, 在终端则使用单点探测器捕获时域干涉强度信号. 要

2019-04-16收到原稿, 2019-05-25收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11603056、11473049)资助

†lltang@niaot.ac.cn

从时域干涉强度信号精确地解算出闭合相位信息,对光程差调制的空间及时间控制精度、时域干涉信号的采样频率、精度提出了极高的要求.首先,光程差调制的精度将受到多种误差源影响,如正弦误差、位移触动物自身误差等,需要对光程差峰-峰幅度、运动周期进行精密的标定;其次,时域干涉信号的采样频率、精度取决于单点探测器的响应速度、模/数(A/D)转换电路的采样频率及转换精度,需要进行合理优化选择以满足进行闭合相位解算的精度.

针对长基线光干涉高分辨成像中闭合相位提取对空间、时间调制精度要求高,信号采样频率高等核心问题,本文提出了一种基于精密光程差调制的时域干涉信号闭合相位提取方法,首先给出了从时域干涉信号中解算闭合相位的理论和数值仿真分析;其次,在实验中利用高速压电陶瓷(PZT)位移触动物在3束干涉臂上引入调制信号,在实验中验证上述方法提取闭合相位的精度和可靠性,为该方法应用在室外长基线光干涉高分辨成像观测中打下基础.

## 2 基于光程差调制的时域干涉信号闭合相位提取基本方法

天文光干涉成像的基本原理是利用有限的空间频谱的振幅及相位信息重构目标天体,其中相位信息决定了对应天体细节结构的位置信息<sup>[7]</sup>,而振幅代表了这些细节结构所占的比重.相较振幅而言,相位信息直接反映天体结构特征,其测量精度决定了进行光干涉图像重构的可靠性和精确性.天文光干涉成像这一技术的重点在于相位的提取,但天体发出的光到达地面干涉仪时会受到大气扰动、仪器振动等多种干扰,闭合相位技术则是排除大气干扰、提升相位探测精度的重要技术途径之一<sup>[8]</sup>.

### 2.1 闭合相位基本理论介绍

在长基线光干涉观测中,对空间频谱的测量是在两个望远镜形成的基线上展开的<sup>[9]</sup>,在基线a上获得的相位信息 $\varphi_a$ 可以表示为:

$$\varphi_a = \varphi_1 - \varphi_2 + \Phi_{12}, \quad (1)$$

其中, $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 表示在望远镜1和2上由于大气扰动、仪器震动等因素所引入或积累的相位误差, $\Phi_{12}$ 则是基线a上获得真实的天体空间频谱对应的相位信息.由于大气扰动等因素的存在,直接测量基线a上的条纹对比度无法直接获得真实的相位信息 $\Phi_{12}$ .

闭合相位方法则是同时在3个望远镜所形成的3条闭合基线a、b、c上进行相位测量,如图1所示,相位信息 $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$ 、 $\varphi_c$ 可以分别表示为:

$$\varphi_a = \Phi_{12} + \varphi_2 - \varphi_1, \quad (2)$$

$$\varphi_b = \Phi_{23} + \varphi_3 - \varphi_2, \quad (3)$$

$$\varphi_c = \Phi_{31} + \varphi_1 - \varphi_3, \quad (4)$$

其中, $\varphi_3$ 表示望远镜3的相位差, $\Phi_{12}$ 、 $\Phi_{23}$ 、 $\Phi_{31}$ 表示真实的天体空间频谱相位,将(2)、(3)、(4)式相加就可以得到闭合相位:

$$\Phi_{123} = \varphi_a + \varphi_b + \varphi_c = \Phi_{12} + \Phi_{23} + \Phi_{31}. \quad (5)$$

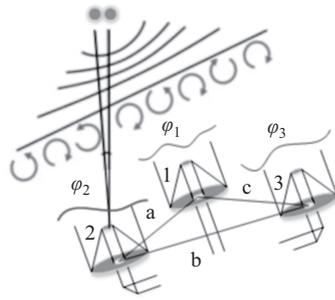


图 1 3架望远镜组成的闭合环

Fig. 1 Closed loop composed of three telescopes

由于大气扰动、望远镜自身误差引起的相位误差源相互抵消, 闭合相位 $\Phi_{123}$ 与天体空间频率真实相位 $\Phi_{12} + \Phi_{23} + \Phi_{31}$ 之和相等. 可以说, 闭合相位是与孔径误差无关的一个量, 并且包含了目标天体空间分布的信息. 当望远镜数目为3时, 已知真实相位其中的两个即可求出第3个. 当望远镜个数为 $N$  ( $N > 3$ )时, 每两个望远镜组成一条基线, 共有 $N \times (N - 1) / 2$ 条基线, 即 $N \times (N - 1) / 2$ 个真实相位. 任意3个望远镜组成一个闭合环, 除去非独立的闭合相位后, 可以得到的独立闭合相位有 $(N - 1) \times (N - 2) / 2$ 个. 尽管未知真实相位的个数总是大于可获得的闭合相位个数, 但从独立闭合相位中可复原的相位信息比例为 $1 - 2/N$ , 可以看出随着 $N$ 的增大, 可复原的真实相位信息越多. 随着计算机计算能力不断提升, 全局优化算法寻优能力不断改进, 闭合相位方法已经在长基线光干涉高分辨成像中得到广泛应用.

## 2.2 基于光程差调制的闭合相位提取方法

本节以3个望远镜形成的闭合环为例, 面向长基线光干涉瞳面合束方式, 阐述一种基于光程差调制的时域干涉信号闭合相位提取方法. 进行闭合相位测量要求来自3个望远镜的光合成一路以形成完美的闭合回路, 而采用瞳面合束的方式仪器终端通常使用单点探测器, 要实现对3条基线上的干涉信号测量, 只能在时域上进行调制以对不同基线上的信号进行区别, 最终获得闭合相位信息<sup>[10]</sup>. 如图2所示,  $t$ 表示时间,  $F$ 表示对时域干涉信号做傅里叶变换(FT)后得到的频谱.  $I_i$ 表示干涉臂 $i$ 上的光强,  $I_{ij}$ 表示基线 $ij$ 上的干涉信号, 具体步骤如下: 在3束星光的光路中加入引入光程差调制元件, 加载频率为 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 的三角波位移信号, 这时在3条基线上将得到不同周期的余弦信号, 在合束器后的探测器上接收到的时域干涉信号 $I(t)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned}
 I(t) = & I_1 + I_2 + I_3 + \\
 & 2\sqrt{I_1 I_2} C_{12} \cos(2\pi f_{12} t + \Phi_{12} + \varphi_2 - \varphi_1) + \\
 & 2\sqrt{I_2 I_3} C_{23} \cos(2\pi f_{23} t + \Phi_{23} + \varphi_3 - \varphi_2) + \\
 & 2\sqrt{I_3 I_1} C_{31} \cos(2\pi f_{31} t + \Phi_{31} + \varphi_1 - \varphi_3), \quad (6)
 \end{aligned}$$

其中,  $C_{ij}$ 表示基线 $ij$ 上获得条纹的对比度,  $\Phi_{ij}$ 表示基线 $ij$ 上的真实相位信息,  $\varphi_i$ 与望远镜 $i$ 相关, 表示由于大气扰动以及干涉臂 $i$ 上机械振动、环境扰动共同累积的相位误差.  $f_{ij}$ 是基线 $ij$ 上合成调制信号的频率, 同时需要保证 $f_{12} \neq f_{23} \neq f_{31} \neq 0$ .

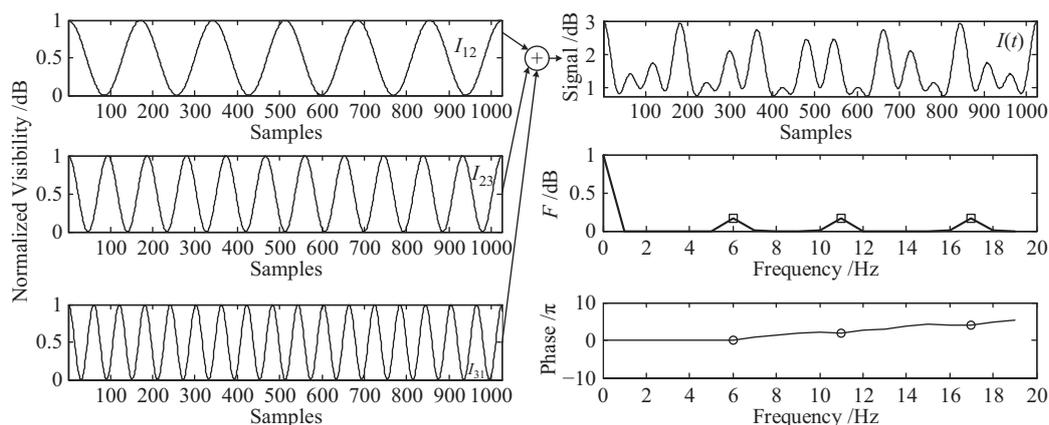


图 2 基于光程差调制的闭合相位提取方法示意图

Fig. 2 Acquisition of the closure phase based on the optical path difference modulation

对于光干涉高分辨成像而言, 可观察量是在基线上测得的条纹可见度信息  $V_{ij}$ , 表示为:

$$V_{ij} = C_{ij} e^{i(\Phi_{ij} + \varphi_j - \varphi_i)}, \quad (7)$$

在对时域干涉信号  $I(t)$  进行 FT, 可以得到:

$$\begin{aligned} \tilde{I}(f) = & (I_1 + I_2 + I_3) \delta(f) + \sqrt{I_1 I_2} V_{12} \delta(f - f_{12}) + \\ & \sqrt{I_2 I_3} V_{23} \delta(f - f_{23}) + \sqrt{I_3 I_1} V_{31} \delta(f - f_{31}), \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\delta$  表示狄拉克函数,  $\tilde{I}(f)$  为  $I(t)$  在频域的表达式,  $f$  表示频率. 对时域干涉信号  $I(t)$  进行傅立叶变换, 可以在对应的调制频率  $f_{ij}$  处得到其模值  $\sqrt{I_i I_j} C_{ij}$ , 对光强进行归一化处理即可获得基线  $ij$  上的条纹可见度振幅信息  $C_{ij}$ . 对于闭合相位信息  $\Phi_{123}$  而言, 是通过  $\tilde{I}(f)$  中各调制频率  $f_{ij}$  处得到的傅立叶变换相位信息  $\Phi_{ij} + \varphi_j - \varphi_i$  进行加和得到:

$$\begin{aligned} \Phi_{123} = & (\Phi_{12} + \varphi_2 - \varphi_1) + (\Phi_{23} + \varphi_3 - \varphi_2) + (\Phi_{31} + \varphi_1 - \varphi_3) \\ = & \Phi_{12} + \Phi_{23} + \Phi_{31}. \end{aligned} \quad (9)$$

对于长基线式光干涉高分辨成像而言, 基于光程差调制的闭合相位提取方法能够将 3 个基线上的干涉信号在频域上进行区分进而获得闭合相位信息, 该方法在技术上易于实现, 在数值处理上也具备简单可靠的优点, 是本文进行精密闭合相位提取研究的基础.

### 3 闭合相位提取仿真及实验研究

本节将对上文所述基于光程差调制的时域干涉信号闭合相位提取方法进行数值仿真. 对于分振幅式干涉, 得到的闭合相位应为  $0$  或  $\pi$  的整数倍. 对 3 束光合束而言, 只需对其中的两束加入光程差调制周期不同的三角波调制信号, 第 3 束光不引入调制信号. 在

数学上这3束光的波函数 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 分别表示为:

$$U_1 = A_1 e^{i(2\pi f_0 t + \varphi_1)}, \quad (10)$$

$$U_2 = A_2 e^{i(2\pi f_0 t + \varphi_2)}, \quad (11)$$

$$U_3 = A_3 e^{i(2\pi f_0 t + \varphi_3)}, \quad (12)$$

加入调制信号后它们的相位可表示为:

$$\varphi_1 = k a_1 \cdot \text{sawtooth}(f_t t, 0.5), \quad (13)$$

$$\varphi_2 = -k a_2 \cdot \text{sawtooth}[f_t (t - \Delta t), 0.5], \quad (14)$$

$$\varphi_3 = 0, \quad (15)$$

其中 $A_1$ 、 $A_2$ 和 $A_3$ 表示3束光的振幅,  $f_0$ 表示光束频率,  $a_1$ 和 $a_2$ 表示两个调制信号的幅值,  $k$ 表示波数,  $\text{sawtooth}$ 表示产生三角波的函数,  $f_t$ 表示三角波信号的频率,  $\Delta t$ 表示调制信号开启的时间差. 将这3束光叠加即可得到干涉光强的表达式为:

$$I = |U_1 + U_2 + U_3|^2 \quad (16)$$

$$= A^2 \left[ 3 + e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{i(\varphi_1 - \varphi_3)} + e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + e^{i(\varphi_2 - \varphi_3)} + e^{i(\varphi_3 - \varphi_1)} + e^{i(\varphi_3 - \varphi_2)} \right].$$

首先考虑在 $\Delta t$ 为0的情况下, 从0时刻开始采集时长 $T$ 为0.2 s的干涉信号, 对干涉光强表达式 $I$ 做FT, 去除零频与负频率, 可将干涉信号在频域中归一化表示为:

$$F\{I\} = \delta\left(f - \frac{2a_1 f_t}{\pi}\right) + \delta\left(f - \frac{2a_2 f_t}{\pi}\right) + \delta\left[f - \frac{2(a_1 + a_2)f_t}{\pi}\right], \quad (17)$$

可知该干涉信号中应包含3个非零的频率分量, 分别对应了3束光两两干涉后形成的3个干涉信号的频率, 由于上文中假设其中一个调制信号的幅值为0, 因此这里3个频率分量的大小体现为两个不同幅值的调制信号对应的调制频率以及它们的和频.

如图3为干涉信号在时域与频域上的图像, 光波长632.8 nm, 截取信号时长0.2 s, 采集速率2000 s<sup>-1</sup>, 三角波调制信号频率为2 Hz, 3个三角波调制信号的幅值分别为7.119  $\mu\text{m}$ 、4.746  $\mu\text{m}$ 和0  $\mu\text{m}$ , 对应干涉信号的调制频率为90 Hz、60 Hz和0 Hz. 从右图中可知干涉信号中含有的非零频率有60 Hz、90 Hz与150 Hz, 对该频域信号取角谱得到这3个频率的相位分别为 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 和 $\varphi_3$ , 将相位相加即得到了闭合相位 $\Phi_{123} = \pi$ .

如图4所示为 $\Delta t$ 为0时三角波叠加图像(左)与频域图像(右), 当 $\Delta t = 0$ 时由于调制信号之间不存在相位差, 在干涉信号中只存在和频信号, 非零频率成分有60 Hz、90 Hz和150 Hz.

当 $\Delta t \neq 0$ 时, 干涉信号中的频率成分将根据 $\Delta t$ 的变化而变为3个调制信号两两的差频, 或是差频与和频共存. 当 $\Delta t$ 为0.25 s时, 干涉信号在频域中将刚好体现为两两差频, 如图5所示, 两个三角波的相位差刚好移动了半个周期, 叠加之后体现在干涉信号中非零频率成分有60 Hz、90 Hz和30 Hz, 该干涉信号在频域中可表示为:

$$F\{I\} = \delta\left(f - \frac{2a_1 f_t}{\pi}\right) + \delta\left(f - \frac{2a_2 f_t}{\pi}\right) + \delta\left[f - \frac{2(a_1 - a_2)f_t}{\pi}\right], \quad (18)$$

取各频率分量的相位并求和后依然可得到闭合相位 $\Phi_{123} = \pi$ .

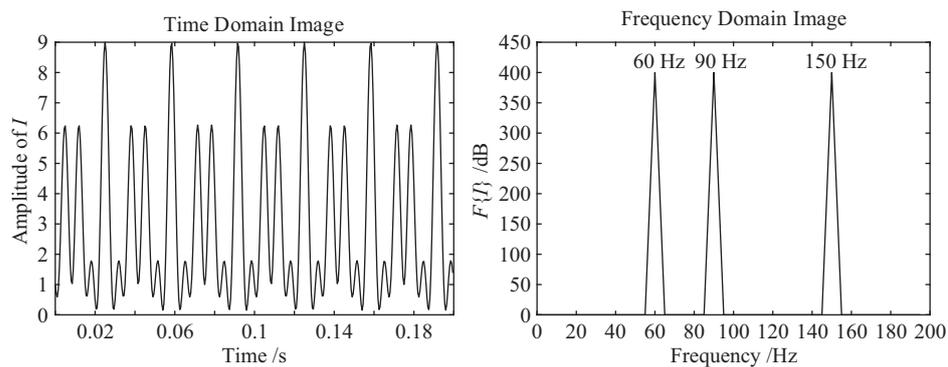
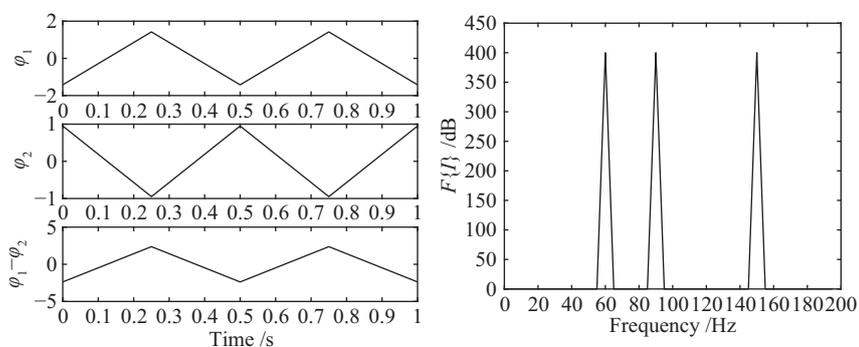
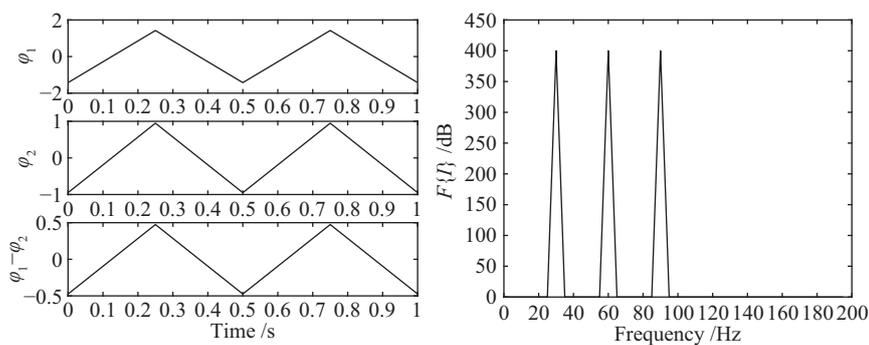


图 3 模拟干涉信号在时域与频域上的图像

Fig. 3 Simulating the image of interferometric signal in the temporal domain and the frequency domain

图 4  $\Delta t$ 为0时三角波叠加图像(左)与频域图像(右)Fig. 4 Triangle wave superposition in the temporal domain (left) and the frequency domain (right) when  $\Delta t = 0$ 图 5  $\Delta t$ 为0.25 s时三角波叠加图像(左)与频域图像(右)Fig. 5 Triangle wave superposition in the temporal domain (left) and the frequency domain (right) when  $\Delta t = 0.25$  s

如图6所示, 考虑 $\Delta t$ 在采集时长 $T = 0.2$  s以内, 并且从0时刻开始采集的情况, 干涉信号在频域中体现为差频与和频共存, 此时干涉信号在频域中可表示为:

$$F\{I\} = \delta\left(f - \frac{2a_1 f_t}{\pi}\right) + \delta\left(f - \frac{2a_2 f_t}{\pi}\right) + \left(\frac{T - \Delta t}{T}\right)^2 \delta\left[-\frac{2(a_1 + a_2)f_t}{\pi}\right] + \left(\frac{\Delta t}{T}\right)^2 \delta\left[f - \frac{2(a_1 - a_2)f_t}{\pi}\right]. \quad (19)$$

选取两个具有代表性的时间间隔进行讨论. 当 $\Delta t$ 为0.1 s时, 干涉信号中非零频率成分有30 Hz、60 Hz、90 Hz和150 Hz, 且和频150 Hz信号与差频30 Hz信号的功率相等, 无论是与差频的相位相加求和或与和频的相位相加求和均得到了闭合相位 $\Phi_{123} = \pi$ . 当 $\Delta t$ 为0.13 s时, 干涉信号中非零频率成分有30 Hz、60 Hz、90 Hz和150 Hz, 数值仿真结果表明差频30 Hz的功率明显大于和频150 Hz. 取各频率分量的相位, 此时差频与和频的相位差值较大, 用60 Hz、90 Hz与差频30 Hz的相位求和得到闭合相位 $\Phi_{123} = 1.0093\pi$ , 精度有所下降.

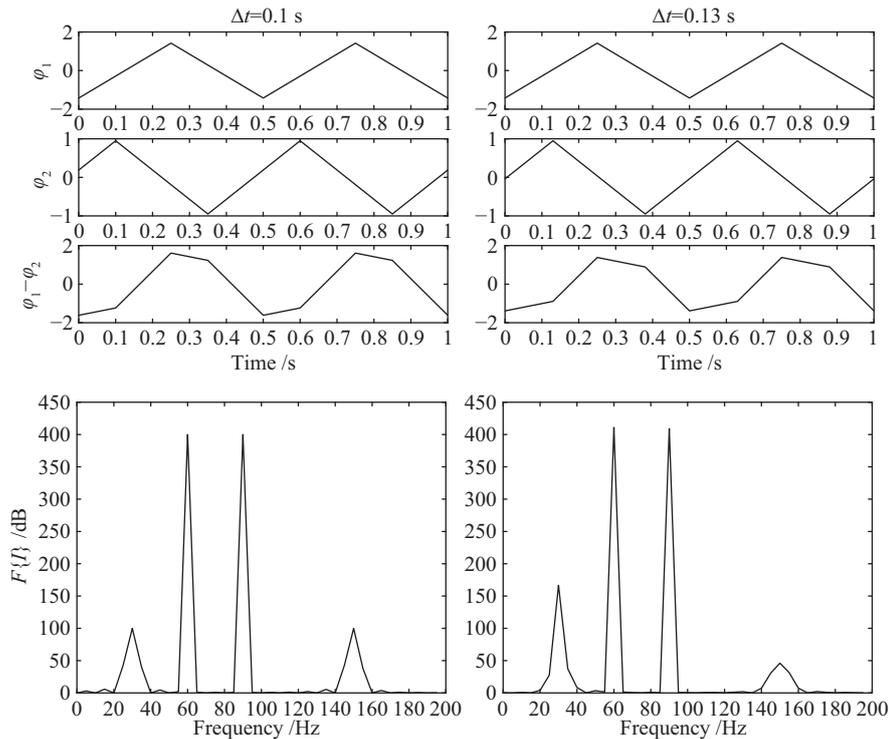


图6  $\Delta t$ 分别为0.1 s和0.13 s时三角波叠加图像(上)与频域图像(下)

Fig. 6 Triangle wave superposition in the temporal domain (top) and the frequency domain (bottom) when  $\Delta t = 0.1$  s and  $\Delta t = 0.13$  s

上述数值模拟结果表明,在时域干涉信号闭合相位提取过程中,需要对两路光程调制的相位进行严格匹配,防止干涉信号出现和频与差频信号共存的现象,导致闭合相位求解灵敏度和精度的下降.

## 4 闭合相位探测实验系统

提取闭合相位信息是光干涉成像的核心技术,闭合相位的检测精度很大程度决定了图像重构的质量.闭合相位技术本身能够消除由于大气扰动、干涉仪内部环境扰动导致的相位误差,其测量误差来源主要是由于闭合相位基线不完美闭合、进行光程差调制的位移控制偏差以及时域干涉信号采样率等问题.为了实现精密的闭合相位测量,首先,在合束方式上宜采用“All-in-One”的合束结构,保证了3路干涉光自合束器到达探测器上经历完全一致的光学路径,这就解决了相位完美闭合的问题;其次,在进行闭合相位提取时,有效时域干涉信号的周期应为整数,以保证在进行FFT变换时,频谱峰值信号不会在功率谱上溢出.这就要求在进行光程差调制时必须保证足够的位移控制精度,保证三角波峰-峰值为波长整数倍,另一方面为了保证FFT变换的精度,时域干涉信号采集必须具备足够高的时间分辨率.

基于上述思想,在实验室搭建如图7所示的闭合相位探测实验系统.整个光路在典型迈克耳逊干涉系统的基础上进行改造:干涉臂上的平面镜被替换成角锥棱镜,保证在进行光程差调制过程中不引入波前倾斜扰动;在迈克耳逊系统的一个干涉臂上额外分束出一路,形成了3路光干涉系统;3路光最终在分束器4上汇合,形成“All-in-One”的合束方式.角锥棱镜安装在由PZT驱动的精密切移平台上,实施光程差调制;3路合束光最终经偏振片后聚焦在单点探测器上,并由高速数据采集卡将数据传递至工控机.

整个实验涉及两个关键过程,首先是对光程差调制进行位移精度校准,其次是基于时域干涉信号的闭合相位提取.

### 4.1 光程差调制位移精度校准

本实验所使用的PZT采用闭环控制,尽管可以达到纳米级别的位移分辨能力,但考虑到光轴与运动轴不平行导致的余弦误差,必须对PZT进行位移精度校准.本文在不使用额外激光干涉仪的条件下,利用现有实验光路,实现了PZT的精密校准.将PZT调制的光束与未加入调制的光束进行相干叠加,探测器处接收到干涉信号和 $t$ 时间内得到的条纹周期数 $N$ 与调制信号的频率 $f_i$ 之间存在 $N = f_i t$ 的关系,因此可以通过这个周期数来确定实际调制位移的大小.周期数由干涉信号通过最小二乘拟合获得,如图8所示.

通过周期数 $N$ 可知实际光程的调制量 $S = N \cdot \lambda$ ,PZT设定的光程调制量为 $S_0 = 2A f_i t$ , $A$ 为PZT产生三角波信号的峰-峰值.设定一系列的峰-峰值 $A$ ,分别测量实际光程调制量,建立 $S$ 与 $S_0$ 之间的函数 $S = \beta S_0$ , $\beta$ 为校正系数.从图8中可以看出由于余弦误差的存在,实测位移总是大于PZT设定的位移,并且随距离增加这个偏差呈线性增长,通过数值拟合可以得到 $\beta$ .

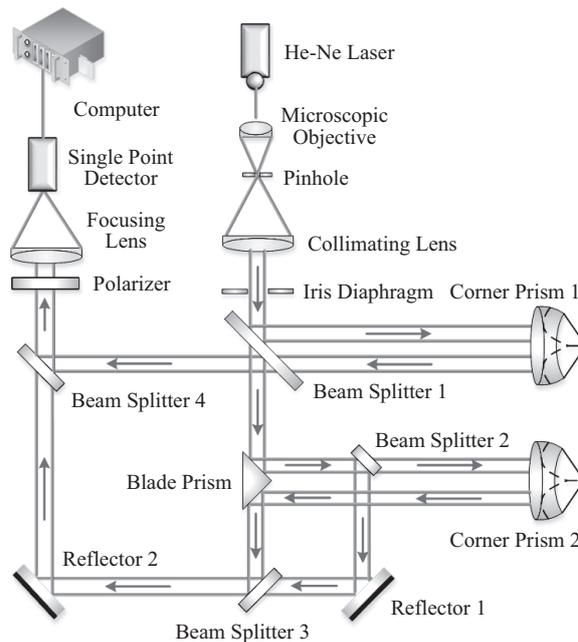


图 7 基于光程差调制的闭合相位提取实验光路

Fig. 7 Experimental light path of acquisition of the closure phase based on the optical path difference modulation

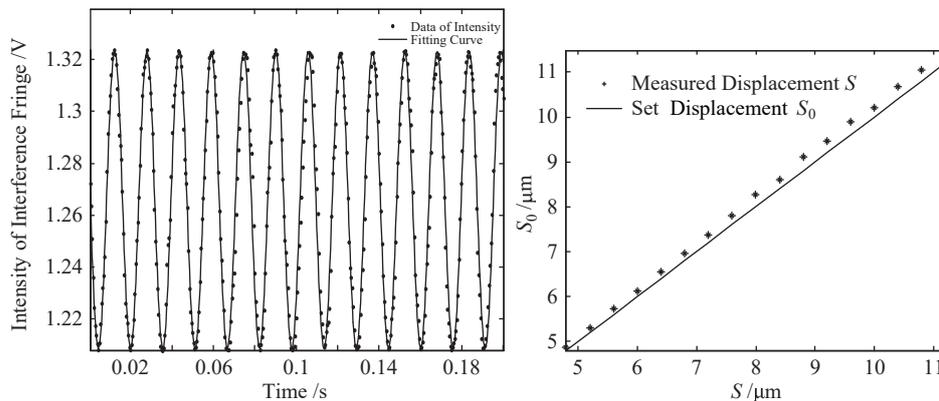


图 8 时域干涉条纹及周期数拟合(左)和PZT实测位移数据与设定位移对应关系(右)

Fig. 8 Fringes in temporal domain and cycle numbers with least squares fitting (left), and corresponding relationship between measured displacement data of PZT and the set displacement (right)

在实验中, 为了得到波长整数倍的三角波调制量 $S$ , 首先将PZT位移量 $S_0$ 设定为 $S/\beta$ , 然后再反复微调 $S_0$ 的数值, 确保 $S$ 为波长的整数倍. 在PZT校正实验中设定的干涉条纹采集时间为0.2 s, He-Ne激光器波长632.8 nm, 两路调制信号的频率分别为60 Hz与90 Hz, 在0.2 s采集时间内对应干涉条纹周期数为12与18. 在对PZT校正前测得余弦误差达到190 nm和300 nm, 对应的周期数误差为2.6%. 经过上述校正过程后, 测得产生调制信号的周期数为11.9711与18.0300, 误差分别为0.24%与0.17%, 光程调制的

位移偏差均在20 nm以内,大幅提升了调制信号的精度,达到了校正PZT位移调制精度的目的.

#### 4.2 精密闭合相位提取

提取时域干涉信号的闭合相位涉及两个关键的步骤:一是光程调制器的同步,当两个PZT生成的三角波相位匹配时,只产生和频或差频信号,如果相位差值在 $0-\pi$ 之间,和频和差频信号会同时存在,降低闭合相位探测的灵敏度.在实验使用双通道信号发生器作为三角波信号源,接入PZT控制器模拟量控制通道,实现了两路PZT光程差调制相位的硬件同步;二是在时域干涉信号的采集过程中,首先要保证单点探测器输出电压信号的A/D转换精度,其次是要采用高速电路确保时域信号的采样率,本实验使用16 bit A/D转换模块保证了电压信号转换的分辨率,采样率达到5 kHz可保证进行FFT变换所需的时间分辨率.

图9为3束光合束形成的信号,左图为单点探测器上得到的3束光干涉形成的时域干涉信号,右图为时域干涉信号的傅里叶变换频谱信息.从频谱图中可以清晰地分辨出该时域干涉信号中主要包含了3个频率分量,分别为两个PZT调制信号对应的60 Hz、90 Hz以及150 Hz和频信号,与本文通过数值模拟得到的结论一致,但由于进行实验时3束光的强度并不完全相同,因此由时域干涉信号提取出的3个频率上的频谱强度也不相同.

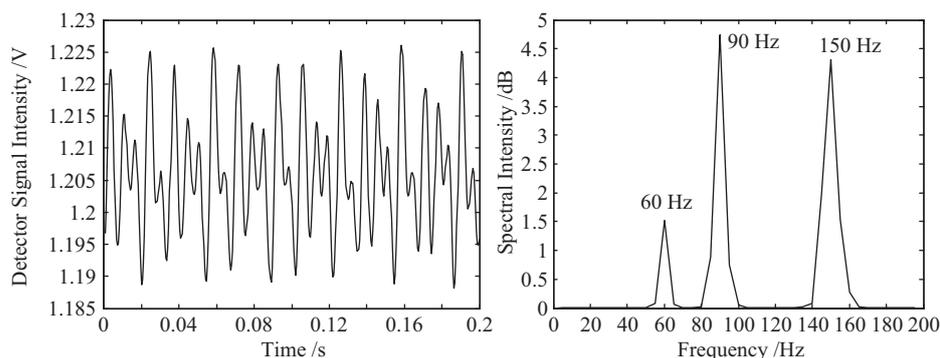


图9 3束光合束形成时域干涉信号(左)和时域干涉信号的频谱(右)

Fig. 9 Temporal domain interferometric signal with three beams of light (left) and the spectrum of temporal domain interferometric signal

本实验主要目的是研究时域干涉信号闭合相位精密提取方法,因此我们采用分振幅的干涉方式,其闭合相位值严格地为 $0$ 或 $\pi$ 的整数倍.如图10所示,本实验采集测试了多组时域干涉信号,并分析了60 Hz、90 Hz以及150 Hz频率对应的相位,最终得到了闭合相位信息,实验结果表明闭合相位提取误差上限为2%,测量精度达到 $1/50$ 波长.

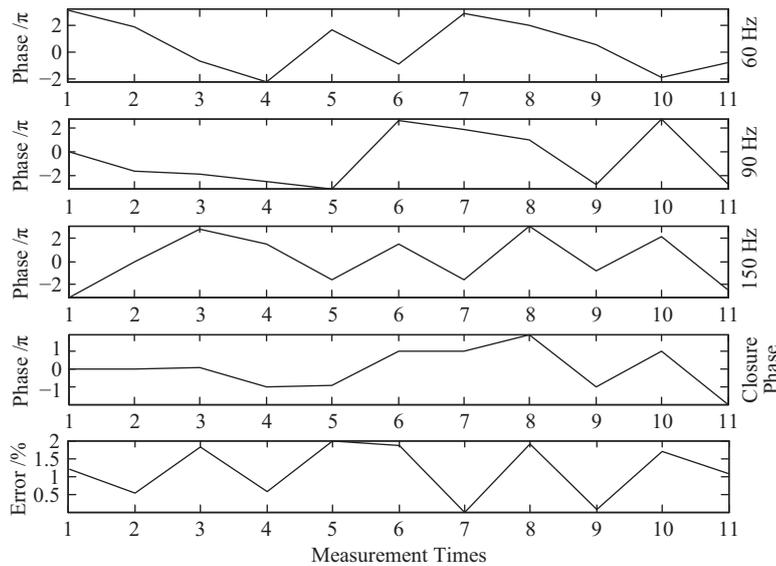


图 10 时域干涉信号闭合相位测量及其误差

Fig. 10 The measurement of closure phase in the temporal domain interferometric signal and its error

## 5 总结与展望

本文提出了一种基于精密光程差调制的时域干涉信号闭合相位提取方法, 并从数值仿真与实验两方面研究了该方法的可行性. 首先利用数值仿真分析了两路光程差调制在不同相位差条件下所生成干涉信号的频谱特征, 严格控制两路光程差调制的相位可以避免和频和差频同时出现, 有利于实现闭合相位提取的灵敏度和精度; 其次为了提升闭合相位提取的精度, 在实验上利用时域干涉信号的波长-周期对应关系对PZT在实际运动中存在的余弦误差进行精密校正, 获得20 nm的位移调制精度. 通过采用高精度的A/D转换模块和高速采集电路, 确保时域干涉信号的采集精度和时间分辨能力, 最后在实验室内成功获得1/50波长精度的闭合相位数据. 在今后的研究中, 我们拟将上述时域干涉信号闭合相位提取方法应用到分波前实验光路中, 开展长基线式光干涉高分辨模拟成像实验.

## 参考文献

- [1] Jennison R C. MNRAS, 1958, 118: 276
- [2] Blasius T D, Monnier J D, Tuthill P G, et al. MNRAS, 2012, 426: 2652
- [3] Schloerb F P. SPIE, 1990, 1237: 154
- [4] Rogstad D H. ApOpt, 1968, 7: 585
- [5] Rhodes W T, Goodman J W. JOSA, 1973, 63: 647
- [6] Baldwin J E, Haniff C A, Mackay C D, et al. Nature, 1986, 320: 595
- [7] Cornwell T J. Science, 1989, 245: 263
- [8] 王海涛, 周必方. 紫金山天文台台刊, 2003, 22: 95
- [9] 陶纯堪, 陶纯匡. 光学信息论. 北京: 科学出版社, 1999: 79-87
- [10] Ceus D, Delage L, Grossard L, et al. MNRAS, 2013, 430: 1529

## Research on Closure Phase Measurement Method of Temporal Domain Interferometric Signal Based on Precise Optical Path Difference Modulation

TANG Lin-lin<sup>1,2,3</sup> HOU Yong-hui<sup>1,2</sup> WEI Wei<sup>1,2,3</sup> XU Teng<sup>1,2</sup>

*(1 Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)*

*(2 Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)*

*(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*

**ABSTRACT** Closure phase method is one of the important techniques to realize high resolution imaging of long baseline stellar optical interferometry, and obtaining accurate closure phase information is a prerequisite for interferometric image reconstruction. A closure phase measurement method for the temporal domain interferometric signals based on the precise optical path difference modulation is proposed in this paper. The non-redundant precise optical path modulation is carried out on the three-way interferometer arm. With multiple interferometric measurements and data fitting, the sinusoidal error in optical path difference modulation is eliminated, and the optical path modulation accuracy is within 20 nm. A high-speed detector is introduced to raise the sampling frequency of the temporal domain interferometric signal, and the temporal domain interferometric signal obtained on the detector is subjected to Fourier transform to obtain the accurate closure phase information of the three-way interferometer arm. The results of laboratory experiments show that the accuracy of the closure phase calculation of the temporal domain signal based on the precise optical path modulation can be improved up to 1/50 wavelength.

**Key words** instrumentation: detectors, techniques: interferometric, closure phase, optical path difference modulation