

文章编号: 0253-2239(2005)04-497-4

任意相位差条纹信号细分方法的研究*

楚兴春 吕海宝 杜列波 周卫红

(国防科技大学机电工程与自动化学院精密机械与仪器系, 长沙 410073)

摘要: 为消除传统细分方法中由于两路条纹信号不正交引入的细分误差, 提出了一种可对任意相位差条纹信号直接细分的新方法。根据两路条纹信号的极性和幅值大小, 把一个信号周期分成 8 个区段。高速采集两路条纹信号, 通过判断信号采样点所处的区段是否跳变对信号幅值交点进行动态跟踪。对不足一个周期的条纹移动, 当测量出起点与终点的幅值, 计算出其所在的区段及位置后, 结合两路信号的交点, 可实现对任意相位差条纹信号的细分。实验结果表明, 该方法突破了传统细分方法必须信号正交的限制, 可对任意相位差信号进行准确地细分, 降低了条纹测量中器件安装与调试的难度, 具有更强的环境适应性和抗干扰能力。

关键词: 光学测量; 条纹信号; 任意相位差; 交点跟踪; 细分

中图分类号: TB921 文献标识码: A

Research on Subdividing Method for Random Phase Difference Fringe Signals

Chu Xingchun Lü Haibao Du Liebo Zhou Weihong

(College of Mechanism Electronics Engineering and Automatization, Notional University
of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: In order to eliminate the subdividing error caused by fringe signals which is not in phase quadrature, a new method that can directly subdivide fringe signals for random phase relationship is presented. One signal period can be divided into eight sections according to the fringe signals polarity and amplitude. The fringe signals are sampled at high speed so that the section in which the sampled point locates can be calculated in real time. The fringe signals absolute amplitude joints can be dynamically traced by judging whether two successive sampling points are in different sections. After the amplitudes of fringe signals star point and stop point are sampled, the section in which they locate can be calculated, the fraction fringe can be worked out by combination of joints of start point and stop point. Experimental results show that the new method can subdivide fringe signals correctly even when they are in random phase relationship. This new method breaks through the limitation that the signals must be in phase quadrature for conventional subdividing methods and has better anti-jamming ability.

Key words: optical measurement; fringe signals; random phase difference; joint tracing; subdividing

1 引 言

条纹测量技术是一种广泛应用于精密检测领域的位置/位移测量技术, 如计量光栅技术和激光干涉技术。近年来随着超精加工技术的发展, 条纹测量技术的发展极为迅速, 成为大量程、高分辨力测量的主要手段。为提高条纹测量的分辨力和细分精度, 人们提出了许多条纹细分方法, 如正切细分法^[1~3]、比例幅值法^[4]、双阈值法^[5]、构造函数法^[6]、脉宽调

制法^[7]等。然而, 这些传统的条纹细分方法都要求两路条纹信号必须正交。当两路条纹信号不正交时, 则会产生细分误差, 降低细分精度, 限制细分倍数。但是, 由于条纹测量中器件安装调试水平和导轨精度的限制, 实际的条纹信号不可能保证绝对正交, 尤其是量程较大时, 两路信号总会出现非正交的情况, 且有一定的随机性和波动性, 难于进行修正。文献[8, 9]分别研究了对正交误差的软件补偿方法, 但是能够补偿的相位角较小, 且计算复杂, 不能满足

* 国家自然科学基金(50175107)资助课题。

作者简介: 楚兴春(1972~), 男, 云南昆明人, 博士, 主要从事光电精密测量与传感技术的研究。E-mail: kejdexc@sohu.com

收稿日期: 2004-07-05; 收到修改稿日期: 2004-09-06

高速测量的需要。迄今为止,能够直接消除条纹信号正交误差的方法尚未见报道。

为实现对任意相位差条纹信号的准确细分,本文分析了相位差变化时两路条纹信号的特点,提出了通过动态跟踪两路信号的交点实现条纹细分的方法,克服了传统条纹细分法必须信号正交的限制,提高了细分准确度,增强了条纹测量技术的环境适应性和抗干扰能力。

2 细分基本原理

由于只考虑两路信号间相位差的变化对细分的影响,所以具有一定相位差的两路条纹信号可表示为

$$\begin{cases} U_1 = U_0 \sin \theta, \\ U_2 = U_0 \sin(\theta + \phi), \end{cases} \quad (1)$$

式中 U_0 为信号幅值; θ 为条纹信号的相位; ϕ 为两路信号间的相位差,当 $\phi = \pi/2$ 时,两路条纹信号正交。

若 d 为条纹移动一个周期代表的位移当量,则条纹移动不足一个周期时,位移量 x 与 θ 的关系为

$$x = \frac{\theta}{2\pi}d, \quad (2)$$

从(2)式可知,只要能够计算出 θ ,就可准确地计算出位移量,实现条纹细分。

图 1 示出了具有不同相位差条纹信号的绝对值波形图。当两路信号正交时,其绝对值波形为 $|\sin \theta|$ 和 $|\cos \theta|$,他们相交于 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 四点,且这四个交点的幅值相等,都为 U_A 。如果以这四个交点和信号过零点为界,一个信号周期可等分为 8 个区段,每个区段所覆盖的相位为 $\pi/4$ 。这是传统细分法对条纹进行准确细分的前提条件。当两路信号不正交时,信号波形变为 $|\sin \theta|$ 和 $|\sin(\theta + \phi)|$,与正交时的情况不同,四个交点分裂成两组,其中 A'_1 和 A'_3 对应的幅值由 U_A 变为 $U_{A'}$,而 A'_2 和 A'_4 对应的幅值由 U_A 变为 $U_{A''}$ 。此时若再以 A'_1 、 A'_2 、 A'_3 、 A'_4 和信号过零点为界将一个信号周期分成 8 个区段,则每个区段覆盖的相位将不完全相同,其中 1、2、5、6 区段覆盖的相位为 θ' ,而 3、4、7、8 象限覆盖的相位为 θ'' ,但恒有 $\theta' + \theta'' = \pi/2$ 。而 θ' 和 θ'' 可通过下式计算:

$$\begin{cases} \theta' = \arcsin(U_{A'}/U_0), \\ \theta'' = \arcsin(U_{A''}/U_0), \end{cases} \quad (3)$$

两路信号间相位差 ϕ 发生变化时,信号波形交点的位置相应地上升或下降, $U_{A'}$ 和 $U_{A''}$ 的值也增大或减小,从而使 θ' 和 θ'' 发生变化。由于光电探测器只能探测条纹的强度变化,而不能直接探测条纹的相位变化,要准确地得到相位 θ' 和 θ'' ,首先必须准确地得到幅值 $U_{A'}$ 和 $U_{A''}$,即跟踪信号交点。

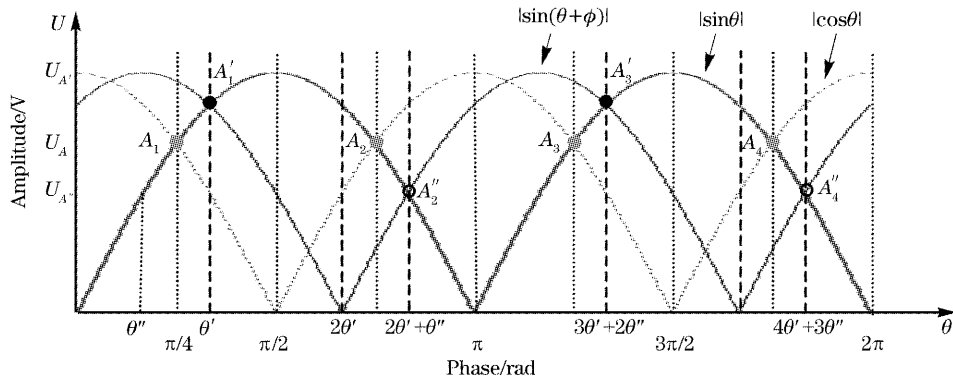


图 1 具有不同相位差条纹信号的绝对值波形与交点位置变化示意图

Fig. 1 Absolute amplitude waveforms of fringe signals with different phase difference and demonstration for position variation of the waveform joints

对信号交点的跟踪,可通过在测量过程中判断信号采样点所处的区段是否发生跳变来实现。首先,对两路信号进行高速同步采样,然后根据表 1 判断出信号采样点所处的区段,并与缓存下来的相邻前一个采样点所处的区段进行比较,如果采样点所处的区段发生了跳变,说明两路信号刚经过交点,此时可将两路采样数据的平均值缓存作为交点幅值。例如,若在某个时刻采样两路信号得到 $\{U_1, U_2\}$,根

据表 1 判断出信号采样点位于区段 2 内,如果缓存下来的相邻前一个采样点位于区段 1 内,则说明信号经过了交点 A'_1 ,此时交点幅值可近似表示为

$$U_{A'} \approx (|U_1| + |U_2|)/2. \quad (4)$$

如果系统采样频率越高,采样时间间隔越短,则由(4)式计算出的 $U_{A'}$ 就越准确。当信号采样点所处的区段由 5 跳变为 6 时,也可计算出 $U_{A'}$ 。同理,当信号采样点所处的区段由 3 跳变为 4 或由 7 跳变为 8 时,

则可计算出 U_A' 。

在由(3)式计算出 θ' 和 θ'' 后,对不足一个周期的条纹移动,若测量起点位于区段 1 内,对应的幅值为 U_{ori} ;测量终点落在任意区段内,对应的幅值为 U_{stp} (为使细分具有较高的灵敏度,在区段 1、4、5、8 内取 $|\sin \theta|$ 的采样值,而在区段 2、3、6、7 内取 $|\sin(\theta + \phi)|$ 的采样值),那么在 $0 \sim \pi/2$ 范围内他们对应的相位分别为

$$\theta_{ori} = \arcsin(U_{ori}/U_0), \quad (5)$$

$$\theta_{stp} = \arcsin(U_{stp}/U_0), \quad (6)$$

此时,从测量起点到终点由于条纹移动引起的相位变化量 θ 可按表 2 所示公式计算,而对应的位移量 x 可由(2)式计算出。对于测量起点和终点落在其他区段内的情况,也有类似表 2 的计算公式,限于篇幅,不一一列出。

表 1 两路条纹信号的分段判据

Table 1 The criterion of fringe signals subsection

U_1 sign	U_2 sign	$ U_1 - U_2 $	Section
+	+	<0	1
+	+	>0	2
+	-	>0	3
+	-	<0	4
-	-	<0	5
-	-	>0	6
-	+	>0	7
-	+	<0	8

表 2 起点在区段 1 内,终点在任意区段内时条纹细分的计算公式

Table 2 Formula of θ when original point locates in section 1 and stop point locates in any section

Stp	Section 1
Section 1	$\theta = \theta_{ori} - \theta_{stp} $
Section 2	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + \theta' - \theta_{stp} $
Section 3	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + \theta' + \theta_{stp}$
Section 4	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + \pi/2 + \theta' - \theta_{stp} $
Section 5	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + \pi/2 + \theta' + \theta_{stp}$
Section 6	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + \pi + \theta' - \theta_{stp} $
Section 7	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + \pi + \theta' + \theta_{stp}$
Section 8	$\theta = \theta_{ori} - \theta' + 3\pi/2 + \theta' - \theta_{stp} $

3 实验验证

为验证新的细分法对任意相位差条纹信号的有效性,我们研制了采用数字信号处理器(DSP)和高速模数转换器为核心的条纹计数细分装置。该装置的

输入信号峰峰值为 4 V,最高采样速率可达 1 MHz,采样数据长度为 10 Bit。同时,为了进行比较,设计了两套计数细分软件,一套基于传统的正切细分法原理,另一套基于本文提出的细分法原理。两种细分方法的细分倍数都为 1000。实验中,两种计数细分方法对采集数据的所有前期处理均完全相同。

实验中,用特制的信号发生器产生两路具有一定相位差的正弦信号以模拟由光电探测器接收得到的条纹信号。该信号发生器输出的两路信号相位差可调,输出步长可控,叠加在上面的噪声电平约为 5 mV。图 2 所示为信号发生器输出的两路信号在不同相位差时形成的利萨如图。由于要验证的是细分准确性,所以实验中控制信号发生器的输出为一个信号周期,且假设一个信号周期代表的位移当量为 $1 \mu\text{m}$ 。实验结果如图 3、图 4 所示。

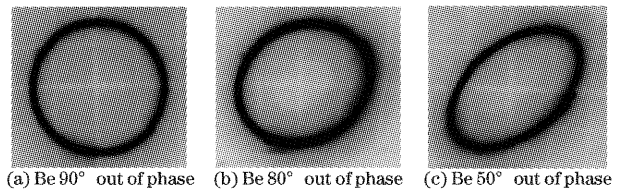


图 2 信号发生器输出的两路信号形成的利萨如图

Fig. 2 Lissajou figure formed by two sine signal outputs from signal generator

图 3 为输入两路正交信号,即相位差等于 90° 的两路信号时的细分和误差曲线,可以看出,不论是采用正切细分法还是本文提出的细分法,在一个信号周期内,细分结果与理论值都基本保持一致,细分误差小于 ± 2 ,这主要是由信号发生器的高频噪声电平引起的。这表明对于正交信号,两种方法都能进行准确可靠的细分。

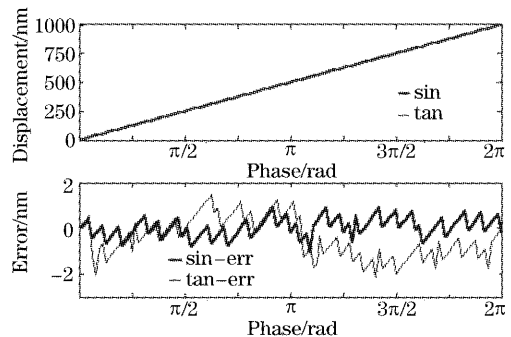


图 3 输入正交信号时的细分和误差曲线

Fig. 3 Subdividing and error curves for orthogonal input signals

图 4(a)为输入相位差为 80° 的两路信号时的细分和误差曲线。可以看出,正切细分法的结果与理

论值之间有一定的误差,该误差呈周期性,最大误差约为-20;而本文细分方法的最大误差仍为2,与图3的结果没有大的区别。

图4(b)是输入相位差为50°的两路信号时的细

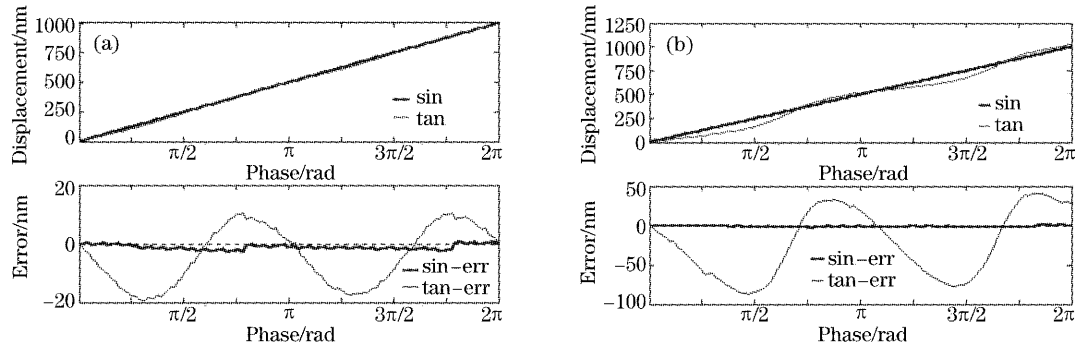


图4 输入相位差为(a)80°和(b)50°时两路信号的细分和误差曲线

Fig. 4 Subdividing and error curves for input signals being 80° (a) and 50° (b) out of phase

从上面三组实验结果可以得出结论,传统的基于正交信号的计数细分方法在两路信号不正交时会产生细分误差,细分误差在一个信号周期内呈周期性,且两路信号偏离正交态越远,细分误差越大。而本文提出的细分方法通过动态跟踪信号交点,能够实时跟随两路信号间相位的变化,对不同相位差的输入信号没有明显的细分误差,表明该方法消除了信号不正交时引入的细分误差,具有更高的细分准确度。

该方法目前已在我们研究的大量程纳米分辨率光栅位移传感器中得到运用,实际测试结果表明该方法具有更高的细分准确度和抗干扰能力,同时使器件安装和调试变得相当容易。

4 结 论

本文提出的可对任意相位差条纹信号进行准确细分的方法突破了传统细分方法只能处理正交信号的限制,无需信号正交,只要两路信号具有一定的相位差,就可对其进行准确的细分,彻底消除了两路信号不正交时引入的细分误差。该细分方法的采用,使条纹细分具有的准确度更高,具有更强的环境适应性和抗干扰能力,同时降低了条纹测量中对器件安装调试和导轨精度的要求。

参 考 文 献

1 Yu Wenxin, Hu Xiaotang, Zou Ziqiang. A subdivision method with high resolution and high response speed in grating-based nanometrology[J]. *J. Tianjin University*, 2002, **35**(1): 1~4 (in Chinese)

分和误差曲线。可以看出,正切细分法的结果具有明显的周期性,这与正切细分法对信号的分段有关,最大误差约为-80;而新的细分方法则能与理论值保持一致,没有明显的细分误差。

余文新,胡小唐,邹自强. 一种高分辨力和高频响的光栅纳米测量细分方法[J]. *天津大学学报*, 2002, **35**(1): 1~4

2 Chu Xingchun, Lü Haibao, Cao Juliang. Research on direction recognizing and subdividing method for moiré (interference) fringes[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 692~694

3 Chu Xinchun, Lü Haibao, Du Liebo. New subdivision and direction recognizing method of moiré (interference) fringes[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 475~477 (in Chinese)

楚兴春,吕海宝,杜列波. 莫尔(干涉)条纹计数细分与辨向技术的研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 475~477

4 Zhu Yuanfang. Ratio amplitude method to achieve high subdivision of measure scale grating[J]. *Aviation Precision Manufacture Technique*, 1995, **31**(4): 29~32 (in Chinese)

朱彦芳. 实现光栅高细分的比例幅值法[J]. *航空精密制造技术*, 1995, **31**(4): 29~32

5 Su Shaojing, Liu Hui, Wang Yueke *et al.*. A novel virtual instrument for displacement measure by processing moiré signals [C]. *2nd International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, 2002, **1**: 436~440

6 Yuan Xiaobin, Li Huaiqiong. Digital subdividing technique for grating moiré fringes and its error analysis[J]. *J. Xi'an Highway University*, 2001, **21**(1): 113~115 (in Chinese)

袁小滨,李怀琼. 光栅莫尔条纹数字细分技术及其误差分析[J]. *西安公路交通大学学报*, 2001, **21**(1): 113~115

7 Cao Jianian, Li Xuyou, Zhang Likun *et al.*. Research on increasing the accuracy of a interferometric fiber optic sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1103~1107 (in Chinese)

曹家年,李绪友,张立昆. 提高数字式干涉型光纤传感器条纹细分的研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1103~1107

8 Li Jiangguo, Xuan Ming, Wang Yifan. Software compensation method of phase error in moiré strip division [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(1): 69~73 (in Chinese)

李江国,宣明,王一凡. 莫尔条纹细分中相位误差的软件补偿方法[J]. *光学精密工程*, 1995, **3**(1): 69~73

9 Jing Fangsheng, Chen Guilong, Hao wei. Phase quadrature error compensation of moiré fringe signals[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1996, **17**(1): 45~48 (in Chinese)

景芳盛,陈桂龙,郝伟. 光栅莫尔条纹信号正交误差的补偿[J]. *计量学报*, 1996, **17**(1): 45~48