

新型可调谐外腔半导体激光器光频扫描干涉测距的方法

邓忠文, 刘志刚, 陶龙, 吕涛, 令锋超

(西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对光频调谐器件压电陶瓷的形变滞后对测量精度的影响, 提出了一种采用局部二次曲线过渡的激光器驱动信号波形的修正方法。利用扫描法布里-帕罗干涉仪测得的光频率扫描时间, 建立了激光器扫频驱动过程的传递函数模型, 采用最小二乘峰值检测法来识别干涉信号的波峰, 通过建立的激光器扫频驱动控制传递函数模型, 对激光器光频率非线性输出进行了补偿。实验结果表明, 激光扫频驱动信号波形修正方法可消除干涉信号转折处的波形畸变, 而相位测量、激光器输出的补偿方法可将测量系统的重复精度、定位精度提高约10倍。

关键词: 驱动信号; 相位测量; 非线性输出

中图分类号: TH161.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-987X(2013)05-0000-00

Novel Frequency Scanned Interferometry Absolute Distance Measurement by Tunable External-Cavity Diode Laser

DENG Zhongwen, LIU Zhigang, TAO Long, LV Tao, LING Fengchao

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the issue of measurement accuracy affected by hysteretic PZT deformation in absolute distance measurement system, by tunable external-cavity diode laser frequency scanned interferometry, a modified strategy with driving laser signal waveform of partial quadratic curve transition in time domain, is proposed. By least square peak detection of interference signal, the effect of tuning nonlinearity on the interference signal is analyzed. The non-linear system output is compensated by analyzing the transfer function of laser control system. The results indicate that the correction of driving signal effectively improves the waveform distortion of the interference signal, and the measuring accuracy is increased tenfold with phase measurement and compensation for linear laser output.

Keywords: driving signal; phase measuring; non-linear output

激光绝对测距方法(ADM)在无导轨大尺寸精密测量与大型装备装配姿态在线控制等方面, 有着广泛应用前景和巨大发展潜力。例如, 大型粒子直线对撞机ATLAS粒子探测器的校准、大型地面望远镜、航天器编队等, 都采用了激光绝对测距技术^[1]。目前, ADM主要有时间飞行法、相位法, 这些方法的测距系统简单、灵活性较高, 但测量精度较低, 且主要用于工程测绘。多波长干涉法是一种波长合成、逐级精化的测距方法, 基于多波长干涉法的测距系统是高精度绝对测距通常采用的方法, 清华大学利用He-Ne激光器进行了基于多波长干涉法的无导轨绝对测距研究, 在25m的测量范围内取得了140 μ m的测量精度^[2]。但是, 基于多波长干涉法的测距系统较复杂, 且测距时需要预先得到待测距离的初值, 因此测量效率低。

随着功耗低、体积小、可集成、频率易于调制

的半导体激光器^[3]的出现, 激光器光频率扫描无导轨绝对测距已成为新的发展趋势, 它具有测量不受现场通视条件限制、测量过程可断光、测量精度高的特点。Fox-Murphy等人研制了一种新型的基于可调谐激光器的激光绝对测距验证系统, 但激光器的调谐方式是温度调节, 因此激光器的调谐性能差, 测量精度低^[4]。Yang等人开发的单激光绝对测距系统, 在实际工况下的测量精度^[5-6]为5.70 μ m, 但没有考虑驱动信号转折处的非平滑过渡对干涉信号波形的影响。欧洲航天局ESA-PROBA3计划中, Cabral等人开发的由无跳模可调谐外腔半导体激光器和高细度F-P标准具组成的FSI传感器在1m范围内误差^[7]不超过10 μ m, 但该系统并没有考虑非整数周期相位提取对系统测量精度的影响。Pollinger等人发明了一种将频率扫描激光干涉测量法和双波长干涉测量法相结合的绝对测距干涉仪, 在20m范围, 测量不确定度^[1]小于12 μ m, 但是测量系统过于复杂。

收稿日期: 2012-09-26. 作者简介: 邓忠文(1987-), 男, 硕士生; 刘志刚(通信作者), 男, 副教授. 基金项目: 国家“863计划”资助项目(2012AA040701); 国家自然科学基金资助项目(50975225, 50935006)。

网络出版时间: 2013-03-15 11:37

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130315.1137.006.html>

本文在构建了基于激光频率扫描技术的绝对测距系统的基础上,提出了一种采用二次曲线过渡的激光器驱动信号的修正方法;采用一种最小二乘峰值检测法来识别干涉信号波峰,通过建立激光器扫描驱动控制传递函数模型,对激光器光频率非线性输出进行了补偿。

1 测距系统模型及测距原理

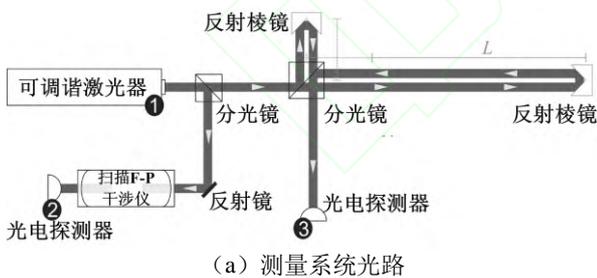
1.1 测距系统光路设计及原理

干涉绝对测距系统由可调谐外腔半导体激光器及控制器、函数信号发生器、扫描 F-P 干涉仪及控制器、光电探测器及控制器、基于迈克尔逊双光束干涉的激光干涉光路等构成(见图1)。

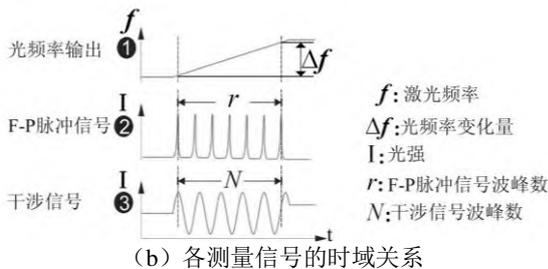


图1 激光频率扫描干涉绝对测距系统示意图

如图2所示,由可调谐激光器射出的频率可调谐激光经分光镜分为两束,参考激光和测量激光,参考激光经反射镜进入扫描 F-P 干涉仪,光频扫描过程中产生的 F-P 脉冲信号由光电探测器检测得到。测量激光进入典型的迈克尔逊双光束干涉光路,经参考反射镜和目标反射镜的两束激光相干叠加,产生的干涉信号通过光电探测器检测得到^[7]。



(a) 测量系统光路



(b) 各测量信号的时域关系
图2 系统光路及测量信号示意图

1.2 测距系统的数学模型

在理想状态下激光器频率调谐,即激光器光频变化率 $\beta(t)$ 为常数

$$\beta(t) = 2f_m \Delta f \quad (1)$$

$$f(t) = f_0 + \beta(t)t \quad (2)$$

式中: f_0 为激光器中心频率, f_m 为驱动控制信号的频率, 干涉光强如下

$$I(t) = I_r(t) + I_m(t - \tau) + 2[I_r(t)I_m(t - \tau)]^{1/2} \cos(\phi(t)) \quad (3)$$

τ 为测量光相对于参考光在时域上的延迟

ϕ 为激光对应的相位, 对式(2)积分可得到参考光相位 $\phi(t)$ 、测量光相位 $\phi(t - \tau)$,

$$\phi(t) = \int_0^t 2\pi f(t) dt = 2\pi f_0 t + \pi \beta(t) t^2 + \phi(0) \quad (4)$$

$$\phi(t - \tau) = 2\pi f_0 (t - \tau) + \pi \beta(t) (t - \tau)^2 + \phi(0) \quad (5)$$

参考光与测量光之间的相位差 $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = \phi(t) - \phi(t - \tau) = 2\pi f_0 \tau + 2\pi \beta(t) t \tau \quad (6)$$

由式(6)可得到相干光在不同目标位置下对应的时刻 t_1 到时刻 t_2 的相位差 $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = 2\pi \beta(t) (t_2 - t_1) = 2\pi \tau = 2\pi N \quad (7)$$

$$I(t) = I_r(t) + I_m(t - \tau) + 2[I_r(t)I_m(t - \tau)]^{1/2} \cos(2\pi f_0 \tau + 2\pi \beta(t) t \tau) \quad (8)$$

测量光相对于参考光在时域上的延迟为

$$\tau = \frac{2Ln}{c} \quad (9)$$

待测光程差表达式如下

$$L = \frac{c\Delta\phi}{4\pi\Delta f n} = \frac{cN}{2\Delta f n} = \frac{cN}{2rFn} \quad (10)$$

式中 n 为空气折射率, F 为自由光谱范围 FSR (1.5GHz), $\Delta\phi$ 以及对应的 Δf 通过测量系统输出的相关信号得到^{[4], [7]}。由式(10)可知, $\Delta\phi$ 、 Δf 可分别转化为对 N 以及 r 的检测, 最终得到待测光程差。

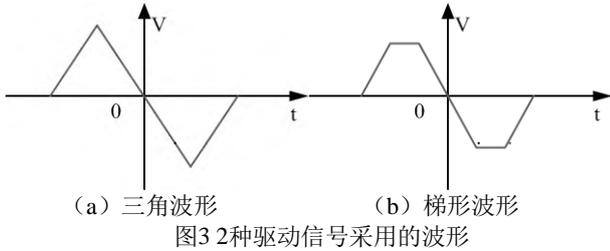
2 激光器驱动信号波形的二次曲线修正

通过控制半导体激光器中的 PZT, 来推动衍射光栅产生转角, 从而实现了可调谐外腔半导体激光器的光频率扫描。因此, 光频变化规律决定于激光器驱动信号的波形, 一般信号发生器生成的驱动信号波形为三角波或锯齿波。

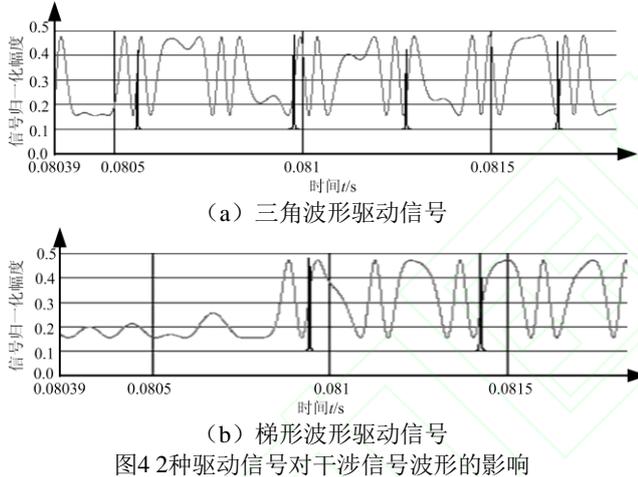
2.1 传统驱动信号波形及对应的干涉信号

如图3所示, 传统驱动信号的原始波形采用三角波和梯形波。实验中, 驱动信号采用如图3a 所示的波形, 当扫描至信号波形转折处时, 扫描速度发生

突变, 实际中 PZT 的形变是滞后的, 无法复现此驱动信号的扫描过程, 造成了时域上对应干涉信号的波形畸变, 如图4a 所示。驱动信号采用图3b 中的梯形波, 在转折处采用了恒定电压值取代三角波的尖点作为过渡, 但是 PZT 作为长度调制期间具有滞后性, 且其形变无法严格维持恒定, 因此该信号波形转折处时域上对应的干涉信号依然存在严重的波形畸变, 如图4b 所示。

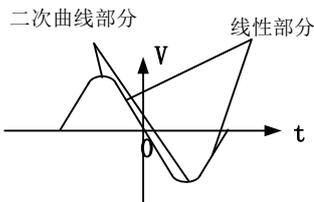


如图4所示, 驱动信号的波形选择将产生对应干涉信号部分的波形畸变, 因此会对干涉信号的相位提取精度产生影响, 进而影响测距系统的测量精度。



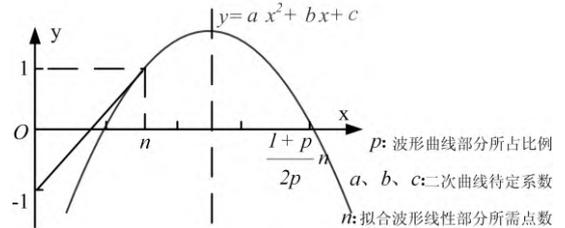
2. 2二次曲线修正原理及实验验证

为了消除因驱动信号转折处波形无法满足光频率调谐要求, 从而导致对应干涉信号波形畸变的现象, 将驱动控制信号波形转折处以与相邻线性部分相切的局部二次曲线过渡, 如图5所示。



如图6所示, 二次曲线应满足的几何关系为: 在切点处斜率、函数值应与波形的线性部分在此切点的斜率、函数值对应相等, 且极值点对应的坐标也

应与图中对应相等。



二次曲线方程及其导数方程为:

$$y = ax^2 + bx + c \tag{11}$$

$$y' = 2ax + b \tag{12}$$

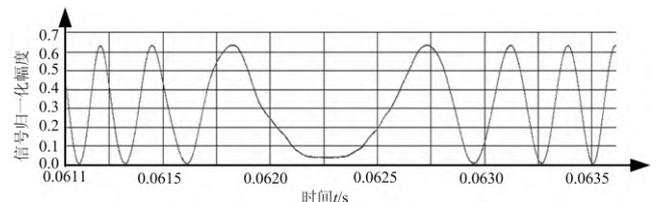
设 n 为通过软件拟合出波形线性部分所需要的点数, 二次曲线应满足如图6的几何条件, 由此得到式 (13)

$$\left. \begin{aligned} an^2 + bn + c &= 1 \\ 2an + b &= \frac{2}{n-2} \\ 2a \frac{1+p}{2p} n + b &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

由式 (13) 得到二次曲线的各待定参数

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{2p}{n(n-2)(p-1)} \\ b &= \frac{2(1+p)}{(n-2)(1-p)} \\ c &= 1 + \frac{2n}{(n-2)(p-1)} \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

如图7所示, 转折处经过局部二次曲线修正后, 保证了时域上驱动控制信号在完整波形下的扫描连续性, 驱动控制信号转折处对应的干涉信号波形的畸变得到了明显的改善。



3 干涉相位测量方法的研究

3.1 时域上干涉相位测量方法

由式 (10) 可知, 干涉信号的相位测量是指 F-P 脉冲信号对所截取的干涉信号部分波峰数 N 的检测, 其中 N 包括完整周期和不完整周期两个部分。

如图8所示, 首先, 通过最小二乘法将待处理干涉信号的波峰波谷位置全部提取, 在时域上, 以 F-P

起始终止波峰所对应的时刻作为干涉信号的截断起始终止时刻，对此范围内的干涉波峰数计数，并将其作为干涉信号完整周期波峰数。其次，在起始终止点附近，以最近相邻波峰波谷间的时间差值作为半基准周期，将不完整周期部分与基准周期的比值作为不完整周期部分的等效波峰数。最后，将两部分波峰数相加得到所截取干涉信号波峰总数。

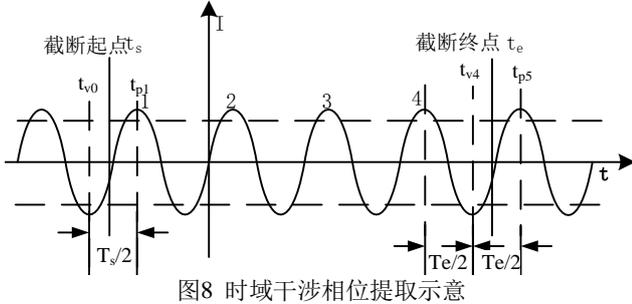


图8 时域干涉相位提取示意

如式 (13) 所示，图8中所截取的干涉信号相位 N 为

$$N = 4 + (t_{p1} - t_s) / (t_{p1} - t_s) + (t_e - t_{v4}) / (t_{p5} - t_{v4}) + 0.5 - 1 \quad (15)$$

基于时域分析的相位测量方法考虑了通过 F-P 脉冲信号截取的干涉信号非整数周期部分所对应的相位提取。与选取干涉信号相邻波峰间的时间间隔作为基准周期相比，其基准周期的选择减小了干涉信号周期随时间变化对相位测量的影响。

3.2 激光器光频率非线性输出补偿

激光频率的可调谐输出是通过驱动信号控制激光器内部的 PZT 产生形变，推动衍射光栅连续产生转角实现的，但是 PZT 作为位移调制器件具有回滞性、非线性^[9]，因此激光器的实际光频率输出存在非线性，如图9所示。

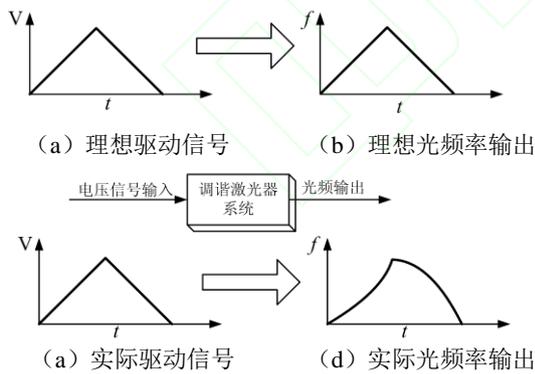
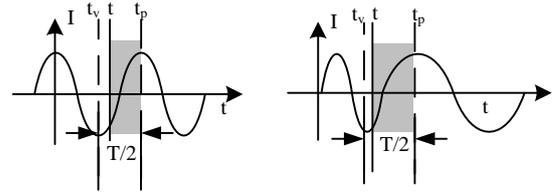


图9 调谐激光器系统输入输出示意图

如式 (7) 所示，激光器光频率的非线性输出使得 $\beta(t)$ 成为关于 t 的变量，干涉信号不再是等周期三角函数，当干涉信号如图10 (b) 所示时，在时域上对干涉信号相位测量，若仍以相邻波峰波谷间的时间差值作为半基准周期 $T/2$ 将导致相位测量误差。因此需要对激光器的光频率输出进行补偿以提高相位测量精度。



(a) 干涉信号周期恒定 (b) 干涉信号周期变化
图10 激光器光频率非线性输出对干涉信号周期的影响

通过实验数据建立激光器扫频驱动传递函数，通过对驱动信号进行修正实现对激光器光频率非线性输出的补偿，如图11所示。

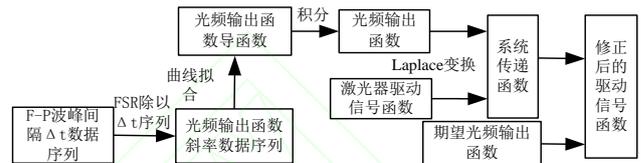
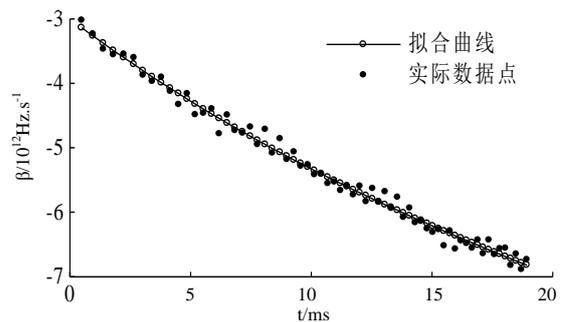
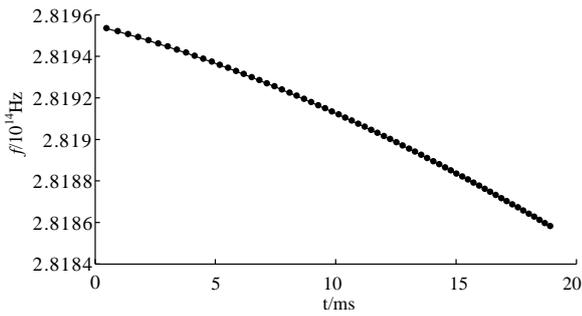


图11 激光器光频率非线性输出补偿原理

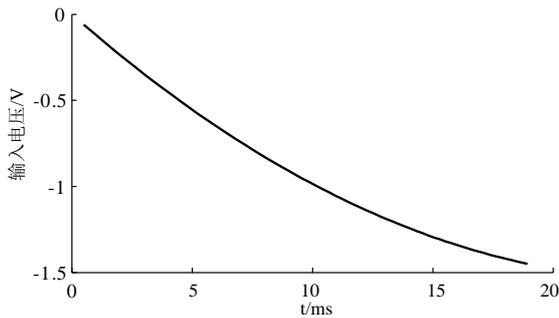
对于驱动信号的反向扫描部分，实验中在线性驱动信号的输入下，通过提取扫描 F-P 干涉仪波峰时间间隔数据序列，利用最小二乘法将数据序列拟合成光频变化率 β 关于时间的曲线，如图12a 所示；通过积分得到对应的光频率 f 的输出函数曲线，如图12b 所示；由此通过 Laplace 变换得到了扫描驱动过程的传递函数；为了消除激光器非线性输出，通过传递函数以及经 Laplace 变换的期望激光器光频率输出函数，经 Laplace 逆变换后，即得到补偿后的激光器驱动信号反向部分曲线，如图12c 所示。依照相同的步骤，可得到补偿后的激光器驱动信号波形正向部分曲线，如图13所示。



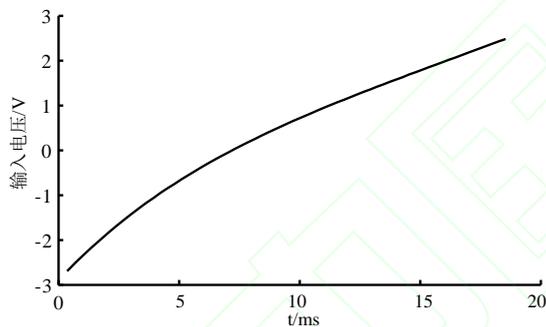
(a) 由实验数据得到的光频率导数拟合成函数曲线



(b) 实验条件下激光器实际的光频率输出曲线



(c) 修正后的激光器驱动信号
图12 驱动信号反向扫描部分修正



修正后的激光器驱动信号
图13 驱动信号正向扫描部分修正

4 测距系统实验

在系统测量过程中利用 Renishaw 激光干涉仪同步测量标定, 将 Renishaw 的测量结果作为标定值对测量系统的定位精度进行评价。

通过移动导轨上的滑块改变目标反射棱镜位置, 在1000mm 内增量重复测量目标反射棱镜的多个位置坐标, 计算各个位置点的测量均值, 如图14所示, D 为测量值与干涉仪的标定值间的偏差, 干涉相位测量方法改进后, 测距系统的定位精度得到了较为显著的提高。

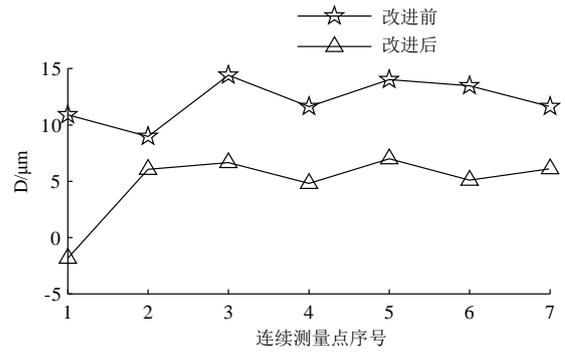


图14 干涉相位测量方法改进前后系统定位精度对比示意

如图15所示, σ 为测量位置点的标准差, 在1000mm 测量范围内, 通过对干涉相位测量方法改进, 测距系统的测量重复精度显著提高。

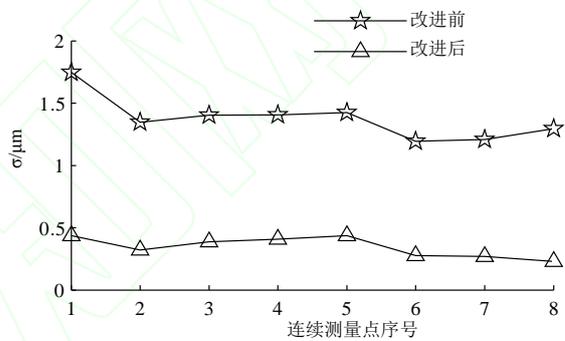


图15 干涉相位测量方法改进前后系统重复精度对比示意

如图14、15所示, 将各点测量值与激光干涉仪标定值的偏差值的最大值作为测距系统定位精度的评价指标; 将各点的测量标准差最大值作为系统重复精度的评价指标。从表1中可以看出, 相位算法的改进对系统的测量精度起到了显著的改善。

表1 改进相位算法前后的测量系统精度指标

改进前		改进后	
重复精度/mm	定位精度/mm	重复精度/mm	定位精度/mm
0.0018	0.015	0.0005	0.006

5 结论

本文建立了一套完整的激光频率扫描测距系统, 在此基础上, 提出了一种采用二次曲线过渡的激光器驱动信号的修正方法; 采用了最小二乘峰值检测法来识别干涉信号波峰, 通过建立激光器扫描驱动控制传递函数模型, 对激光器光频率非线性输出进行了补偿, 并且针对激光器的调谐非线性进行了研究及实验, 从中获得如下结论

(1) 实验结果表明, 传统激光器驱动信号波形使转折处对应的干涉信号波形产生畸变, 但通过采用局部二次曲线过渡的驱动信号波形修正方法, 有效的消除了干涉信号的波形畸变。

(2) 采用时域上的相位测量方法, 以及对激光器的光频率非线性输出补偿, 提高了干涉信号的相位提取精度。实验结果表明, 相位算法改进后, 测量系统的重复精度、定位精度提高了约10倍。

参考文献:

- [1] POLLINGER F, MEINERS-HAGEN K, WEDDE M, et al. Diode-laser-based high-precision absolute distance interferometer of 20m range [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6188-6194.
- [2] 赵洋, 周挺, 李达成. 双波长绝对测距外差干涉仪的研究[J]. *光学工程*, 1999, 19(9): 1274-1278.
ZHAO Yang, ZHOU Ting, LI Dacheng. Study on a Dual-Wavelength Absolute Distance Heterodyne Interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1274-1278.
- [3] YIN Chunyong, CHAO Zhixia. Absolute length measurement using changeable synthetic wavelength chain [J]. *Opt Engng*, 2002, 41(4): 746-750.
- [4] FOX-MURPHY A.F, HOWELL D.F, NICKERSON R. B, et al. Frequency scanning interferometry (FSI): the basis of a survey system for ATLAS using fast automated remote interferometry [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1996, 383(1), 229-237.
- [5] YANG HJ. High-precision absolute distance measurement using dual-laser frequency scanned interferometry under realistic conditions [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2007, 57(5): 395-401.
- [6] YANG HJ, DEIBEL J, NYBERG S, et al. High-precision absolute distance and vibration measurement with frequency scanned interferometry [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(19), 3937-3944.
- [7] CABRAL A, ABREU M, REBORDÃO J M. Dual-frequency sweeping interferometry for absolute metrology of long distances [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8), 1-14.
- [8] 田芊, 廖延彪, 孙利群. *工程光学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 453-460.
- [9] 张存满, 赵洋, 李达成. 采用法布里-珀罗腔的绝对距离干涉系统的方案分析[J]. *光电工程*, 2000, 27(6): 56-58.
ZHANG Cunman, ZHAO Yang, LI Dacheng. Analysis for plan of an absolute distance interferometer system using fabry-perot cavity [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27(6): 56-58.