

文章编号 1004-924X(2015)12-3289-06

基于渐开线原理的快速光学延迟线装置

黄战华, 刘 洋*, 何明霞, 杨振京, 蔡怀宇
(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了提高光学延迟线装置的性能, 基于渐开线原理设计了快速光学延迟线(FODL)装置。分析了渐开线的基本原理并建立了数学模型, 推导了光学延迟线装置的延迟距离公式。对光束通过延迟线装置后的光斑畸变进行了理论与实验分析。最后, 搭建迈克尔逊干涉系统, 对延迟线装置的延迟线性度、延迟平稳性、延迟距离和扫描频率进行了实验验证。结果表明: 对于快速光学延迟线装置, 入射光斑的半径越小, 旋转平面反射镜的旋转角度间隔越小, 出射光束的光斑畸变越小。该装置的延迟距离为 40.036 mm, 延迟时间为 133.453 ps, 线性度误差为 0.419%, 平稳性误差为 0.806%, 扫描频率为 20 Hz。与常用光学延迟线装置相比, 该装置能够提供较大的延迟距离和较高的扫描频率, 同时具有线性度好、平稳性好等优点, 满足快速光学延迟线的使用要求。

关键词: 光学延迟线装置; 渐开线; 线性度; 延迟距离; 扫描频率; 光斑畸变
中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3289

Fast optical delay line device based on involute principle

HUANG Zhan-hua, LIU Yang*, HE Ming-xia, YANG Zhen-ying, CAI Huai-yu

(School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: yang_l@tju.edu.cn

Abstract: To improve the performance of optical delay line devices, a Fast Optical Delay Line(FODL) device was designed on the basis of the principle of involutes. After analysis of the basic principle of involutes, a mathematical model was established and the delay distance formula of the designed FODL device was comprehensively derived. The light spot distortion resulted from the incident light through the FODL device was theoretically and experimentally analyzed. Finally, a Michelson interference system was built to test the specifications of the device, including delay linearity, delay stability, delay distance and scanning frequency. The results demonstrate that the light spot distortion of the FODL device is linked closely to the radius of the incident light spot and the rotation angle interval of the rotating plane mirror. The smaller of the two factors are, the smaller of the light spot distortion will be. As shown by the data analysis, the delay distance is 40.036 mm while the delay time is 133.453 ps. The errors of linearity and stability are 0.419% and 0.806%, respectively. Moreover, the scanning frequency reaches 20 Hz. As compared with the common optical delay line device, the device in this paper provides with a larger delay range and a higher scanning frequency. Meanwhile, it has advantages in scanning lin-

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2015-08-25.

基金项目: 科技部重大仪器专项资助项目(No. 2011YQ150021)

earity and stability, which meets the use requirements of fast optical delay lines.

Key words: optical delay line device; involute; linearity; delay distance; scanning frequency; light spot distortion

1 引言

光学延迟线(Optical Delay Line, ODL)是改变光传输路程变化量的一种延迟装置。它在太赫兹时域光谱技术^[1]、超快时间分辨率光谱技术^[2]、光学相干层析成像技术^[3]以及光学泵浦-探测技术^[4]等光学探测领域有着广泛的应用前景。常用的光学延迟线装置有些是利用步进电机驱动线性微位移平台上的光学背向反射镜,这类光学延迟线具有较长的延迟时间,但由于其具有机械惯性而不能实现快速扫描^[5];也有些是利用压电陶瓷驱动反射镜来改变光束的光程变化量,这种延迟线可以实现 kHz 以上的高速位移改变,但由于压电换能器的位移量为微米量级,故无法满足系统大扫描范围的要求^[6];另外也有延迟线利用电机驱动旋转立方体来改变光程,但它受表面形状的限制,扫描不均匀、线性度差,而且旋转过程中扫描范围不确定^[7]。针对不同场合的使用需求,衍射光栅式扫描延迟装置^[8]、旋转反射镜阵列式延迟线装置^[9]、压电陶瓷驱动反射镜式延迟线装置、光脉冲时间延迟装置^[10]及光波导光学延迟线阵列装置^[11]也相继问世,不过,这些延迟线装置也不尽完美,如 X C Zhang 等人发明的圆形渐开线延迟线只能达到 ns 量级的时间延迟^[12],王月宾等人利用回转螺旋面反射镜实现了全反射式周期性扫描 ODL,其延迟量相比传统抛物线型回转螺旋面反射镜增大了一倍,但其扫描频率只有 7.5 Hz,延迟时间仅为 50 ps^[13]。

本文结合以上 ODL 的优点,提出了一种基于渐开线原理的快速光学延迟线(Fast Optical Delay Line, FODL)装置。该装置由旋转轴、旋转平面反射镜和渐开线曲面反射镜 3 部分组成。通过迈克尔逊干涉系统对该延迟装置的性能进行了测量,结果表明:该 FODL 装置具有延迟距离大、扫描频率高、线性度和平稳性好等优点,可广泛应用于光信息处理系统和时间分辨光学系统中。

2 光学延迟线的原理分析

2.1 光学延迟线的基本原理分析

渐开线有如下两个特性:(1)渐开线上任意一点的法线与渐开线的基圆相切;(2)法线与基圆的切点到渐开线上此点的距离,等于切点到渐开线与基圆起始交点的圆弧长度。因此,光束入射到渐开线曲面上的位置改变会产生位移变化量,引起光程差(Optical Path Delay, OPD)。

渐开线方程一般用参数方程^[14]表示为:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta + r \theta \sin \theta \\ y &= r \sin \theta - r \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

根据渐开线方程计算光学延迟距离时,将实际光路模型转化为数学模型,建立直角坐标系,如图 1 所示。

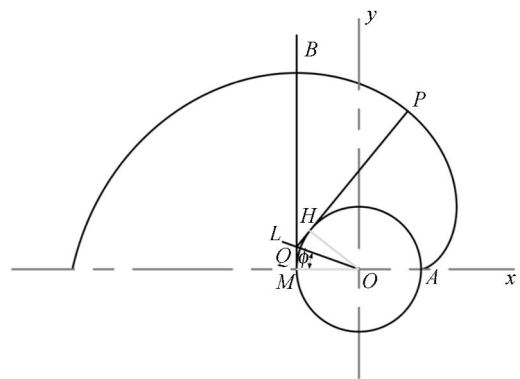


图 1 渐开线数学模型

Fig. 1 Mathematical model of involute

渐开线的基圆中心为直角坐标系圆心 O, OA 轴为 x 轴,与之垂直的为 y 轴。光束沿着 BM 方向入射,在 OL 反射面上发生镜面反射。根据渐开线性质,镜面反射后的光束 PQ 与渐开线基圆相切于 H 点,即 OH 垂直 PQ。由三角形性质可知, MQ = QH。

由渐开线方程(1)得到 P 点坐标为:

$$\begin{aligned} x_p &= r[-\cos 2\varphi + (\pi - 2\varphi) \sin 2\varphi] \\ y_p &= r[\sin 2\varphi + (\pi - 2\varphi) \cos 2\varphi] \end{aligned} \quad (2)$$

其中: r 为渐开线基圆半径, φ 为旋转平面反射镜

的旋转角度(与 x 轴负半轴的夹角)。

从 H 点向 x 轴作垂线,得到 H 点坐标为:

$$\begin{aligned} x_H &= -r \cos 2\varphi \\ y_H &= r \sin 2\varphi \end{aligned} \quad (3)$$

由两点间距离公式得到:

$$HP = r(\pi - 2\varphi) \quad (4)$$

由公式(4)可知, HP 与渐开线基圆半径 r 、旋转平面反射镜的旋转角度 φ 有关。当 FODL 装置加工完成后,渐开线基圆半径 r 已确定,因此,改变基圆上旋转平面反射镜的旋转角度 φ 即可得到光束在 FOLD 装置中的光程。当旋转平面反射镜的旋转角度为 φ 时,光传播的路程 $L = BQ + QP$,根据坐标系中数学关系推导: $L = BM + HP$;当夹角变为 φ' 时, $\varphi' = \varphi + \Delta\phi$,光束的光程 $L' = BM + H'P'$, $\Delta\phi$ 为旋转平面反射镜的旋转角度间隔, $H'P' = r(\pi - 2\varphi') = r(\pi - 2\varphi - 2\Delta\phi)$ 。光束入射到渐开线反射曲面上后返回,此时光程的变化量为光束传播单程的两倍,光程差为:

$$\Delta L = 2(HP - H'P') = 4r\Delta\phi \quad (5)$$

由式(5)可知,光学延迟线的延迟距离与渐开线基圆半径 r 、旋转平面反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi$ 有关。

2.2 光学延迟线的光斑畸变分析

理想点光源入射到 FODL 装置中时,会在旋转平面反射镜处发生镜面反射,反射光线沿着基圆的切线方向入射到渐开线反射曲面上,然后光线垂直反射,沿原路径返回。然而,实验中的光束并非理想光束,而是具有一定尺寸的光束。以理想平面光束为例,光斑入射到渐开线反射曲面上,入射光束在渐开线曲面上发生汇聚,汇聚光线的焦点位置与反射面的曲率半径有关。光束汇聚后发散,发散光束在旋转平面反射镜上反射,相比之前入射到渐开线曲面上的光束,光斑发生畸变。如图 2 所示,以圆光斑上边沿为例分析光斑畸变,入射光束沿 B_1M_1 方向入射,在 OL 反射面上发生镜面反射,传输到渐开线曲面 P 点,反射光束沿 PQ_2 传输,再一次在 OL 反射面上反射,最终沿 Q_2B_2 方向出射。

在 BB_2 截面处,光斑畸变的变形量 $\Delta\omega$ 为:

$$\Delta\omega = (r + x) + (y_B - y) \tan \alpha \quad (6)$$

其中: r 为渐开线基圆半径, x, y 为 Q_2 点坐标, y_B 为 B 的纵坐标, α 为光束在旋转反射镜反射后的发散角。

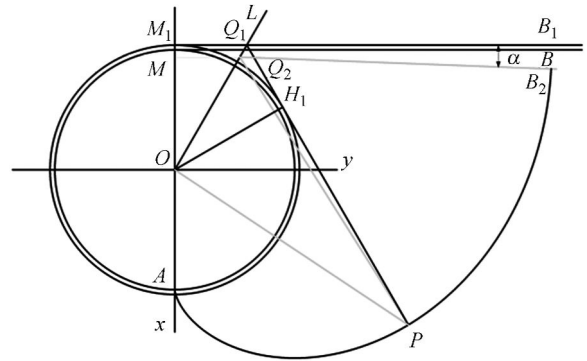


图 2 光斑畸变的理论模型

Fig. 2 Theoretical model of beam distortion

3 实验与分析

3.1 光路系统设计

基于上述对 FODL 装置的分析,设计了光路系统。选取基圆半径 $r = 20 \text{ mm}$,旋转页面数为 4,旋转平面反射镜长度 $R_1 = 26 \text{ mm}$,有效旋转角度间隔 $\Delta\phi = 38^\circ$ 。电机运转一周产生 4 次延迟,频率增加 4 倍。搭建的迈克尔逊干涉系统如图 3 所示,用于分析 FODL 装置的性能。图中 A 为旋转轴,B 为旋转平面反射镜,C 为渐开线曲面反射镜,P 为偏振片,BS 为分光棱镜,R 为反射镜, f_1, f_2 为透镜,D 为实验中 CCD 采集的两光束干涉图。

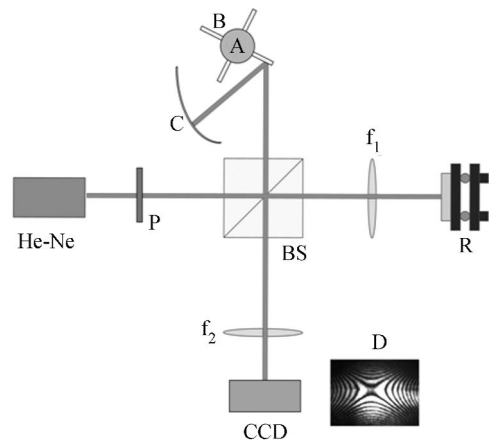


图 3 实验光路图

Fig. 3 Experimental light path

3.2 光学延迟线传输光束畸变分析

光束通过 FODL 装置后,根据式(6)可计算 BB_2 截面处的光斑畸变。如图 4 所示,光斑畸变

与光斑半径 ω 和旋转角度间隔 $\Delta\phi$ 有关,当旋转角度间隔一定时,光斑畸变量随着光斑半径的增加而增大;当光斑半径一定时,光斑畸变量随着旋转角度间隔的增加而增大。

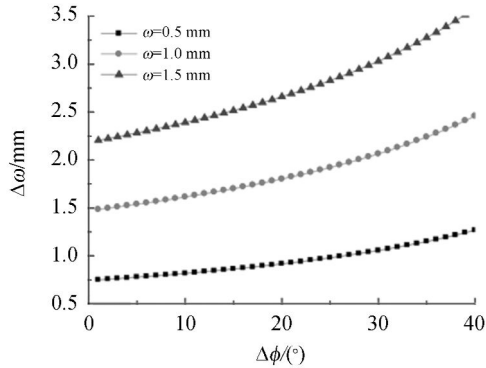


图 4 不同光斑半径下旋转角度间隔与光斑畸变的关系
Fig. 4 Relation between rotation angle interval and beam distortion with different facula radii

出射截面处的光斑畸变分析如图 5 所示。其中,图 5(a)、5(b)为旋转反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi=30^\circ$ 时,光斑半径 ω 分别为 0.5 mm 和 1.5 mm 的理论与实验分析结果,图 5(c),5(b)为光斑半径 $\omega=1.5$ mm 时,旋转平面反射镜旋转角度间隔 $\Delta\phi$ 分别为 15° 和 30° 的理论分析结果。曲线 B, D, F 为入射圆光斑的尺寸,曲线 A, C, E 为通过 FODL 后出射光束的畸变尺寸。

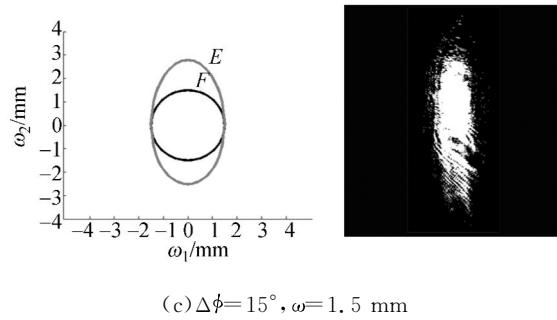
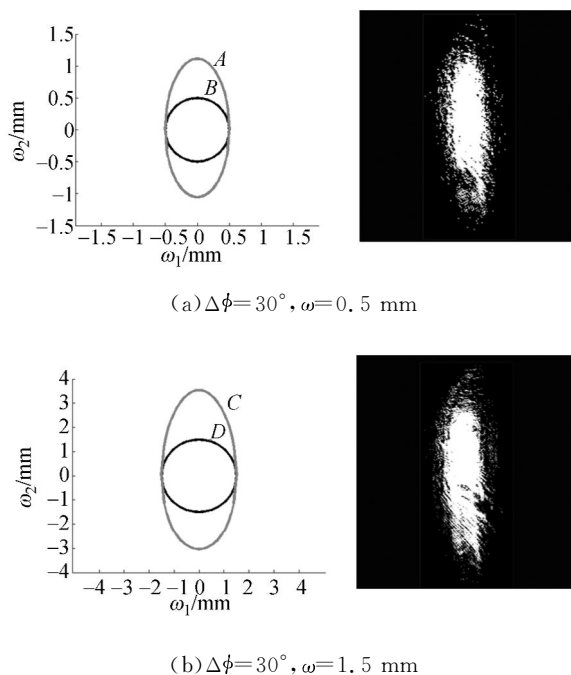


图 5 光斑畸变的理论与实验验证

Fig. 5 Theoretical analysis and experimental validation of beam distortion

表 1 为理论光斑与实际光斑的变形值,由于渐开线不同位置的曲率半径不同,因此上边沿和下边沿的变形量不同。由表 1 可得,入射光斑的半径 ω 越小,旋转平面反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi$ 越小,光线通过光学延迟线装置后的光斑畸变 $\Delta\omega$ 越小。实验结果验证了理论分析的正确性。为保证实验效果,后续实验选取的入射光斑半径 $\omega=0.5$ mm。

本文采用几何光学分析理想平面光束的光斑畸变,而实际情况则应采用高斯光束分析光斑畸变,因此这里对光斑畸变的分析存在一定的误差。

表 1 光斑畸变参数

Tab. 1 Parameters of beam distortion

光斑半径 /mm	旋转角度间隔/ $^\circ$	理论上边沿变形量 /mm	理论上下边沿变形量 /mm	实际光斑变形量 /mm
0.5	30	0.610	0.556	1.20
1.5	30	2.029	1.532	3.59
1.5	15	1.276	1.016	2.34

3.3 光学延迟线的性能分析

FODL 装置的主要性能包括最大延迟距离、延迟线性度和延迟平稳性。本文利用光电探测器和高速采集系统探测干涉条纹,计算延迟距离。为分析 FODL 装置的平稳性,在电机转动稳定后,任意截取采集信号中某两段,观测其信号的周期。图 6(a)为原始信号图,图 6(b)为对原始信号进行低频滤波处理后的信号图,图 6(c)和(d)分别对应图 6(b)中 A, B 两个位置的信号图。通过分析,图 6(c)中信号周期的平均变化量为 0.00154 ms,标准差为 24.464 ns;图 6(d)中信号周期

的平均变化量为 0.001 61 ms,标准差为 37.204 ns。A 段和 B 段的平均周期变化量为 0.001 59 ms,平均变化量差值为 64.309 ns,平稳性误差为 0.806%。可见,FOLD 装置延迟的平稳性较好。

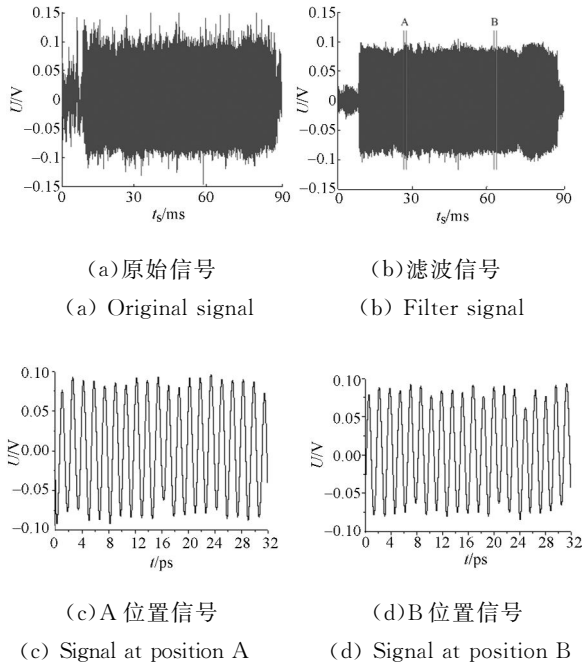


图 6 信号平稳性分析图

Fig. 6 Analysis of signal stability

分析了 FODL 装置的线性度。由式(5)可知,当渐开线基圆半径 $r=20$ mm 时,光程差只与旋转平面反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi$ 有关,且呈线性关系。图 7 为旋转平面反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi$ 与延迟距离 ΔL 的关系曲线,可以看出,实验结果与理论分析基本吻合,误差仅为 0.419%。旋转平面反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi=28.673^\circ$,最终采集信号的波形数为 63 267 个,延迟距离 $\Delta L=40.036$ mm,延迟时间 $\Delta t=133.453$ ps,结果显示该 FODL 具有较大的延迟距离和延迟时间。

为分析 FODL 装置的扫描频率,设置伺服电机在不同转速下转动,转动速度越高,FODL 装置的扫描频率越高。如表 2 所示,旋转平面反射镜的旋转角度间隔 $\Delta\phi=28.65^\circ$ 的情况下,电机转速高于 50 r/min,延迟距离趋于稳定。

参考文献:

[1] 黄战华,胡子晓,何明霞,等. 基于闭环控制的太赫

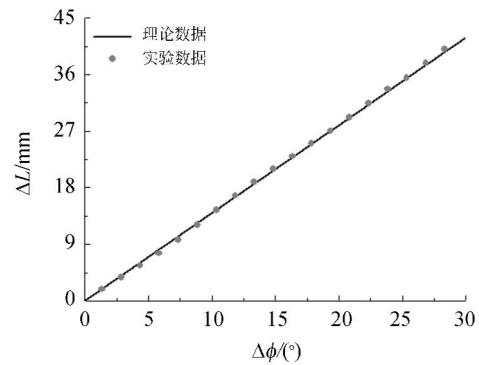


图 7 线性度理论值与实验值的分析图

Fig. 7 Analysis of theoretical value and experimental value of linearity

由于受装置机械结构、电机转动非均匀性等条件的限制,FODL 装置最终测量的实验值与理论值之间存在一定的误差。

表 2 扫描频率分析

Tab. 2 Analysis of scanning frequency

电机转速 /(r · min ⁻¹)	扫描频率 /Hz	理论延迟 距离/mm	延迟距离 /mm
50	3.333	40	40.034
100	6.667	40	40.054
150	10.000	40	40.071
200	13.333	40	40.006
250	16.667	40	40.016
300	20.000	40	40.040

4 结 论

本文根据渐开线原理提出了一种快速光学延迟线装置,推导了延迟距离公式,并进行了光斑畸变的原理分析及实验验证。最后,搭建了干涉光路,分析了快速光学延迟线装置的性能。实验结果表明:快速光学延迟线装置的人射光斑半径越小,旋转平面反射镜的旋转角度间隔越小,出射光束的光斑畸变越小。该装置的延迟距离为 40.036 mm,延迟时间为 133.453 ps,线性度误差为 0.419%,平稳性误差为 0.806%,扫描频率为 20 Hz,能够满足快速光学延迟线的使用要求。

兹时域光谱快速采集[J]. 激光与光电子学进展, 2015,52: 040401-1-8.

HUANG ZH H, HU Z X, HE M X, et al.. Tera-

- hertz time-domain spectroscopy rapid data acquisition based on closed-loop control [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52: 040401-8. (in Chinese)
- [2] 乔自文,高炳荣,陈岐岱,等. 飞秒超快光谱技术及其互补使用[J]. 中国激光,2014,7(4): 588-599.
QIAO Z W, GAO B R, CHEN Q D, *et al.*. Ultra-fast spectroscopy techniques and their complementary usages [J]. *Chinese Lasers*, 2014, 7(4): 588-599. (in Chinese)
- [3] 何卫红,何永红,李鹏,等. 眼底 OCT 成像系统的研制[J]. 光学精密工程,2008,16(3): 438-443.
HE W H, HE Y H, LI P, *et al.*. Development of imaging system for optical coherence tomography in ophthalmology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 438-443. (in Chinese)
- [4] 张立欣. 泵浦-探测实验影响因素的研究[J]. 光学技术,2010,36(3): 453-456.
ZHANG L X. Study on the pump-probe experiment factors [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(3): 453-456. (in Chinese)
- [5] FORK R L, BEISSER F A. Real-time intensity auto correlation interferometer [J]. *Appl. Optics*, 1978,17(22):3534-3535.
- [6] 刘泊,郭建英,孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学精密工程,2013,21(6): 1503-1509.
LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [7] AMY L, OLDENBURG J, REYNOLDS J, *et al.*. Fast-Fourier-domain delay line for in vivo optical coherence tomography with a polygonal scanner [J]. *Appl. Optics*, 2003,42(22):4606-4611.
- [8] 曾楠,何永红,马辉. 用于玉石结构分析的光学相干层析技术[J]. 光学精密工程,2008,16(7): 1335-1342.
ZENG N, HE Y H, MA H. Imaging and analyzing subsurface morphologies of jade objects with optical coherence tomography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):1335-1342. (in Chinese)
- [9] MING L. Kilohertz scanning optical delay line employing a prism array [J]. *Appl. Optics*, 2001,40(34):6334-6336.
- [10] 王竞,李建中,温伟峰,等. 利用自相关方法实现光脉冲时间延迟精度测量[J]. 中国光学,2015,8(2): 270-276.
WANG J, LI J ZH, WEN W F, *et al.*. Precisely measuring for optical pulse time delay using auto correlation [J]. *Chinese Optics*, 2015,8(2):270-276. (in Chinese)
- [11] 李浩,宋玲玲,张立钧,等. 4 通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列的设计与制备[J]. 中国光学,2014,7(3): 435-441.
LI H, SONG L L, ZHANG L J, *et al.*. Design and fabrication of 4 channels silica cross optical waveguide delay line array [J]. *Chinese Optics*, 2014,7(3):435-441. (in Chinese)
- [12] XU J ZH, ZHANG X C. Circular involute stage [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(17): 2082-2084.
- [13] WANG Y B, WANG CH L, XING Q R, *et al.*. Periodic optical delay line based on a tilted parabolic generatrix helicoids reflective mirror [J]. *Appl. Optics*, 2009,48(11):1998-2005.
- [14] 赵军,邓兴拓,叶婷,等. 一种渐开线圆柱齿轮离散点模型的建立方法[J]. 机械传动,2014,38(12): 41-45.
ZHAO J, DENG X T, YE T, *et al.*. A method of the establishment of involute cylindrical gear discrete-point model [J]. *Mechanical Transmission*, 2014, 38(12):41-45. (in Chinese)

作者简介:



刘洋(1990—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: yang_l@tju.edu.cn

导师简介:



黄战华(1965—),男,湖北孝感人,教授,博士生导师,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989、1992年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电子信息、图象处理与模式识别、计算机应用与工业控制等技术的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn