

# 高速高稳定性光学延迟线装置

黄战华, 杨振京\*, 蔡怀宇, 何明霞, 刘洋

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 为提高基于渐开线原理的快速光学延迟线(FODL)装置的扫描频率和延迟时间,提出一种具有高速及高稳定性特点的光学延迟线装置,分析了延迟线装置装配误差引起的出射光束角度偏转和光程差变化。通过迈克耳孙干涉系统验证装置的扫描频率、延迟时间、延迟平稳性和延迟线性度四个方面的特性。实验结果表明,延迟线装置的装配精度较高,可实现高速高稳定性扫描和较大的光学延迟,其扫描频率为 100 Hz,延迟时间为 167.45 ps,延迟距离为 50.06 mm,平稳性误差为 0.25%,线性度误差为 0.05%。

**关键词** 测量; 光学延迟线装置; 装配误差; 渐开线; 平稳性误差; 扫描频率

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.031202

## Optical Delay Line Device with High Speed and High Stability

Huang Zhanhua, Yang Zhenjing, Cai Huaiyu, He Mingxia, Liu Yang

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Collage of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** In order to enhance the scanning frequency and delay time of the fast optical delay line (FODL) device based on the principle of involutes, an optical delay line device with high speed and high stability is proposed. The angle deflection and optical path difference change of emergent light caused by the assembly error of the delay line device is analyzed. The characteristics of the device including the scanning frequency, delay time, delay stability and delay linearity are tested with the Michelson interference system. The experimental results show that the delay line device possesses high assembly accuracy and can realize high-speed and high-stability scanning and large optical delay, with the scanning frequency of 100 Hz, the delay time of 167.45 ps, the delay distance of 50.06 mm, the stability error of 0.25%, and the linearity error of 0.05%.

**Key words** measurement; optical delay line device; assembly error; involute; stability error; scanning frequency

**OCIS codes** 120.4570; 120.1880; 120.5800; 120.3180

## 1 引言

光学延迟线(ODL)是一种能够改变光程的装置,在太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)、光学相干断层成像技术(OCT)、超快时间分辨率光谱技术等光学探测领域有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。在典型的太赫兹(THz)时域光谱系统中,ODL装置通过步进电机带动微位移平台上的反射镜来实现光学延迟,由于微位移技术具有较高的可靠性且成本较低,这种方法被广泛地使用。虽然这种方法能够进行高精度的 THz 脉冲重建,但是需要花费大量时间,通常扫描一个信号需要数秒<sup>[4]</sup>。早期提出的基于检流计的延迟线可用于高速 THz 脉冲扫描,这种延迟线能够达到 300 ps 的延迟时间,但仅能达到 30 Hz 的扫描频率,而且这种装置的反射镜产生的光学延迟在时间上是非线性的<sup>[5]</sup>。Probst 等<sup>[6]</sup>将旋像棱镜应用在 THz 光路中,采用这种方式的 ODL 装置能够达到 380 Hz 的扫描频率和 100 ps 的延迟时间。然而,这种装置产生的光学延迟与旋转角度呈现很强

收稿日期: 2016-10-13; 收到修改稿日期: 2016-11-21

基金项目: 科技部重大仪器专项资助(2011YQ150021)

作者简介: 黄战华(1965—),男,博士,教授,主要从事光电图像和光电子信息技术方面的研究。

E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: yzj\_357@tju.edu.cn

的非线性关系,需要花费大量的时间对原始数据进行标定。目前,许多基于曲面和旋转反射镜的方法被应用于 THz 光路中<sup>[7-10]</sup>,采用这些方法产生的光学延迟量与旋转角度呈线性关系。这些装置通过在一个旋转体上设置多面反射镜,扫描频率能够提高一个数量级,具有较大的延迟时间和扫描频率。Xu 等<sup>[11]</sup>研制了圆形渐开线光学延迟器,能够实现纳秒级的时间延迟。Wang 等<sup>[12]</sup>采用回转螺旋面反射镜实现了全反射式周期性扫描 ODL,其延迟距离相比传统抛物线形回转螺旋面反射镜的延迟距离增大一倍,但其扫描频率只有 7.5 Hz,延迟时间仅为 50 ps。Huang 等<sup>[13]</sup>设计了基于渐开线原理的快速光学延迟线(FODL)装置,采用固定在旋转轴上的平面反射镜与渐开线曲面反射镜组合来实现光学延迟,该装置能够实现 133.453 ps 的延迟时间,具有较好的延迟线性度和平稳性,但仅能够实现 20 Hz 的扫描频率。

基于上述 FODL 装置的设计原理,为了提高扫描频率和延迟时间等性能,提出一种高速高稳定性 ODL 装置。通过对 FODL 装置装配误差引起的出射光束角度偏转和光程差变化进行分析,并依据理论分析调节延迟线装置,使用短焦距透镜对光斑聚焦并使用 CCD 接收,计算光斑偏移量并验证分析结果;搭建迈克耳孙干涉系统验证了延迟线装置的延迟时间、延迟线性度等性能参数。结果表明,该装置的出射光斑偏移量较小,符合光电导天线的尺寸要求;能够实现 100 Hz 的扫描频率和 167.45 ps 的延迟时间,平稳性误差和线性度误差分别为 0.25% 和 0.05%,具有较好的稳定性和线性度。

## 2 FODL 装置及其装配误差分析

### 2.1 FODL 装置的机械原理与结构

基于渐开线原理的 ODL 装置如图 1(a)所示,主要由旋转轴 C、旋转平面反射镜 B 和渐开线曲面反射镜 A 组成。图 1(b)是光路示意图,其中对光束传播起主要作用的是旋转平面反射镜 B 和渐开线曲面反射镜 A。平面反射镜 B 的反射面垂直通过转轴,渐开线曲面反射镜 A 以转轴轴心为基圆圆心满足渐开线曲线公式,即满足光束垂直入射并且垂直反射。

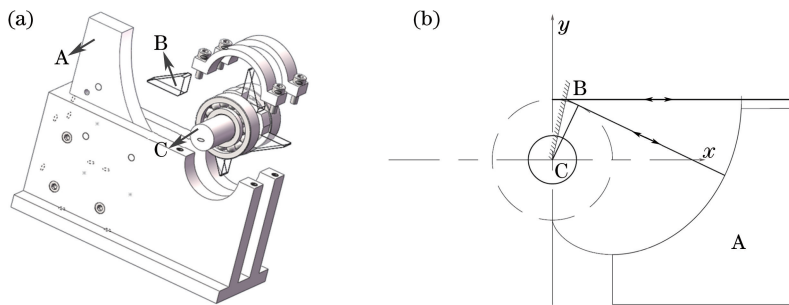


图 1 FODL 装置示意图。(a)机械示意图;(b)光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FODL device. (a) Mechanical schematic diagram; (b) light path schematic diagram

渐开线曲面反射镜 A 使用两组微调自锁螺钉,两组螺钉对渐开线曲面分别具有拉力和推力作用,以实现渐开线曲面反射镜 6 个自由度的调节。平面反射镜 B 采用胶合的方式固定于转轴的基准面上,旋转轴 C 使用两个轴承盖固定于支架上。由于实际进行装调时会产生装配误差,延迟线装置装配误差分析是指对由装配误差引起的光束出射位置、方向以及光程差变化进行分析。假设装置具有较高的加工精度并且平面反射镜 B 具有较高的胶合精度,那么 FODL 装置的装配误差主要来源于旋转轴 C 的偏心以及渐开线曲面反射镜 A 的偏移和倾斜。

### 2.2 转轴偏心和渐开线曲面反射镜偏移的误差分析

假设为理想光束入射,且只考虑光束的中心主光线, $x$  为水平方向, $y$  为竖直方向,当转轴发生偏心以及渐开线曲面反射镜发生偏移时,其光束传播路径如图 2 所示,其中  $\delta L$  表示平面反射镜上光束出射位置的偏差量。

以图 2(a)为例说明光束传播过程。理想基圆圆心为  $O$  点,当转轴轴心位于理想圆心时,光束沿  $BH$  路径入射,经过渐开线曲面反射镜反射后沿原路返回。偏心后的基圆圆心位置为  $O_1$  点,光束在偏心后的旋转反射镜  $O_1Q_1$  上发生镜面反射,反射光束入射到渐开线曲面反射镜上  $P_0$  点,由于渐开线以  $O$  为基圆圆心, $P_0$  点法线方向为  $P_0Q$ ,因此反射光沿  $P_0N$  反射,最终沿着  $NB_1$  出射,相对入射光束  $BH$  产生角度偏差  $\delta\varphi$  和光程差变化。

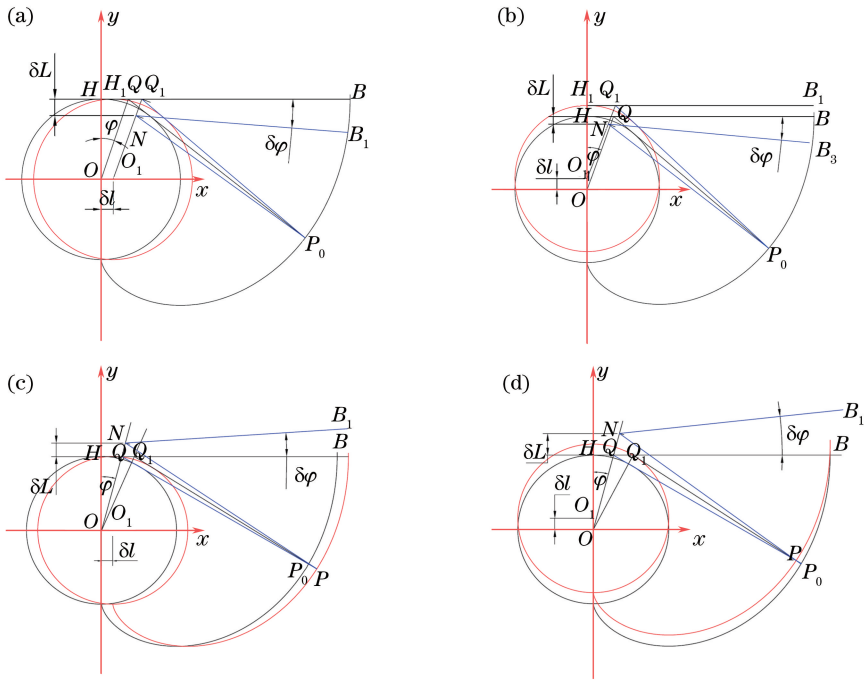


图2 光路示意图。(a)转轴发生水平偏心;(b)转轴发生竖直偏心;(c)曲面反射镜发生水平偏移;(d)曲面反射镜发生竖直偏移

Fig. 2 Light path schematic diagram. (a) Horizontal shaft eccentricity; (b) vertical shaft eccentricity; (c) horizontal curved-surface-reflector deviation; (d) vertical curved-surface-reflector deviation

根据以上光束传播的过程,建立数学模型进行分析。设偏心距离 $|OO_1| = \delta l$ ,旋转平面镜与初始位置间转角 $\angle HOQ = \varphi$ ,这里将 $\delta l$ 和 $\varphi$ 设为已知,则点 $Q(r \tan \varphi, r)$ ,渐开线曲线方程可表示为

$$\begin{cases} x = r(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) \\ y = -r(\cos \varphi + \varphi \sin \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $r$ 为基圆半径, $\varphi$ 为平面反射镜旋转角度。由(1)式可求出点 $P_0$ 的坐标,由 $P_0$ 作圆 $O_1$ 的切线,可求出点 $Q_1$ 的坐标;由 $P_0, Q_1, Q$ 三点坐标求出直线 $P_0Q_1$ 和 $P_0Q$ 的方程,进而求出直线 $P_0Q_1$ 关于直线 $P_0Q$ 的对称直线,该直线与旋转反射镜所在直线 $O_1Q_1$ 相交于点 $N(x_N, y_N)$ 。根据余弦定理,可得

$$|P_0N|^2 + |P_0Q_1|^2 - 2 \cdot |P_0N| \cdot |P_0Q_1| \cdot \cos \angle NP_0Q_1 = |NQ_1|^2, \quad (2)$$

从而求出 $\angle NP_0Q_1$ ,且由几何关系可知, $\delta \varphi = \angle NP_0Q_1$ 。对上述数学模型求解分析,旋转轴偏心量和曲面反射镜偏移量 $\delta l$ 分别取值为 $-3, -5, -7, 3, 5, 7 \mu\text{m}$ ,平面反射镜旋转角度 $\varphi$ 在 $5^\circ \sim 40^\circ$ 之间变化,分析转轴偏心和曲面反射镜偏移引起的旋转平面反射镜出射光束与入射光束的角度偏转量,结果如图3所示。在装配误差较小(微米量级)时,由曲线可以看出:

1) 转轴偏心和曲面反射镜偏移引起的出射光束角度偏转量基本一致,装配误差小于 $7 \mu\text{m}$ 时,偏转角度小于 $0.025$ ;

2) 转轴水平偏心和曲面反射镜水平偏移时,装配误差引起的出射光束与入射光束间的偏转角 $\delta \varphi$ 随着转角 $\varphi$ 的增加而增大,呈线性关系;转轴竖直偏心和曲面反射镜竖直偏移时,偏转角 $\delta \varphi$ 随着 $\varphi$ 的增加先增大后减小,呈非线性关系;

3) 转轴偏心和曲面反射镜偏移引起的光束出射方向相反。转轴水平和竖直的正向偏心使出射光束在水平以下出射,反向偏心使出射光束在水平以上出射;曲面反射镜水平和竖直的正向偏移使光束在水平以上出射,反向偏移使出射光束在水平以下出射。

依据上述方法建立的数学模型,分析转轴偏心和曲面反射镜偏移引起的光程差改变量,理论上延迟线装置产生的光程差可表示为<sup>[13]</sup>

$$L = 4r \Delta \varphi, \quad (3)$$

式中 $\Delta \varphi$ 为平面镜旋转角度间隔。取 $\Delta \varphi$ 变化范围为 $5^\circ \sim 40^\circ$ ,设 $\Delta L$ 为光程差改变量,通过数学模型求解偏

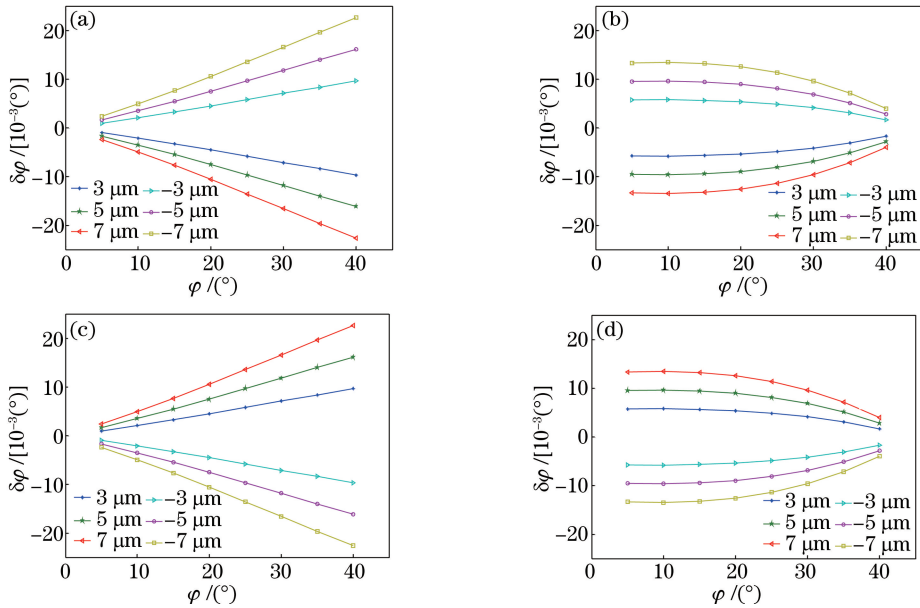


图 3 出射光束的角度偏转。(a)转轴发生水平偏心;(b)转轴发生竖直偏心;(c)曲面反射镜发生水平偏移;(d)曲面反射镜发生竖直偏移

Fig. 3 Angle deflection of emergent light. (a) Horizontal shaft eccentricity; (b) vertical shaft eccentricity; (c) horizontal curved-surface-reflector deviation; (d) vertical curved-surface-reflector deviation

心后的光程差,计算出的光程差改变量如图 4 所示。由曲线可以看出,转轴偏心和曲面反射镜偏移引起的光程差改变量都随旋转角度间隔的增加而增大;装配误差为微米量级时,延迟线装置的光程差改变量为微米量级,相对精度达到 0.03%。

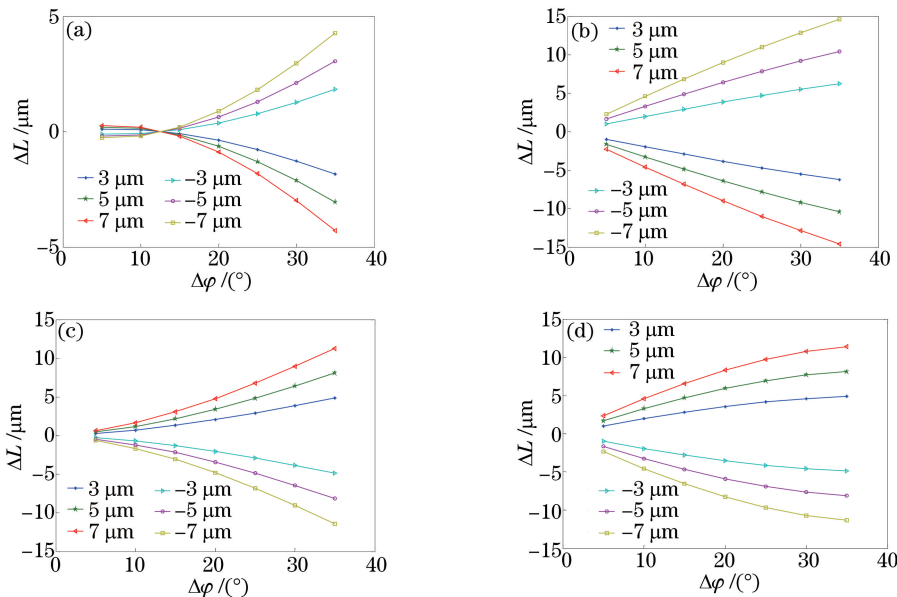


图 4 光程差的变化。(a)转轴发生水平偏心;(b)转轴发生竖直偏心;(c)曲面反射镜发生水平偏移;(d)曲面反射镜发生竖直偏移

Fig. 4 Change of optical path difference. (a) Horizontal shaft eccentricity; (b) vertical shaft eccentricity; (c) horizontal curved-surface-reflector deviation; (d) vertical curved-surface-reflector deviation

### 2.3 渐开线曲面反射镜倾斜的误差分析

假设旋转平面反射镜 B 具有较高的胶合精度且位于理想位置,并假设为理想光入射且只考虑光束的中心主光线,当渐开线曲面反射镜 A 相对 B 发生一定角度  $\theta$  的倾斜时,光路如图 5 所示。

光束平行入射到旋转反射镜 B 上,沿镜面法线方向反射至渐开线曲面反射镜 A 上,当渐开线曲面反射镜 A 发生  $\theta$  角度倾斜时会产生如下结果:

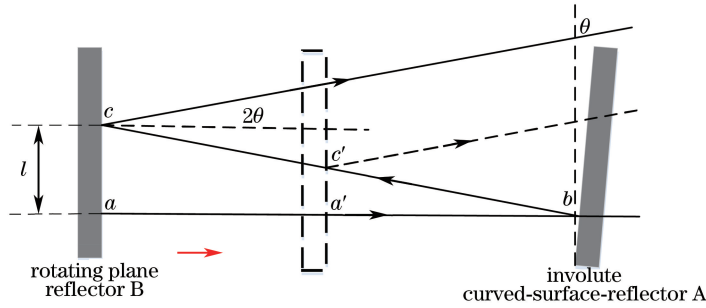


图5 渐开线曲面反射镜倾斜时的光路图

Fig. 5 Light path schematic diagram when involute curved-surface-reflector is inclined

1) 光束在渐开线反射镜上的入射位置发生偏离,相对原入射位置沿光束传播方向有一定位移,该位移量由光束倾斜角  $\theta$  和入射点距边缘距离决定,引起出射光束的变化可参考图 2(c)和 2.2 节内容进行分析;

2) 延迟线装置出射光束在水平方向发生  $2\theta$  偏转,旋转平面反射镜上光斑在水平方向上发生偏移  $l$ ,并且当旋转角度改变时旋转平面镜 B 位置发生改变,光斑偏移  $l$  随之改变。二者将会引起出射光斑水平方向上的偏移,同时也会改变光束光程差。

对结果 2) 进行数值分析,由图 5 所示光路可知,旋转平面镜上光斑的水平偏移量为

$$l = L_{\text{arc}} \cdot \tan \theta, \quad (4)$$

式中  $L_{\text{arc}}$  为旋转平面镜与初始位置之间的弧长,根据渐开线原理,其数值等于旋转平面镜与渐开线曲面反射镜之间的距离。建立数学模型对旋转平面镜光斑偏移量进行数值分析,取倾斜角  $\theta$  分别为  $0.3^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $0.7^\circ$ ,基圆半径  $r=20$  mm,数值分析结果如图 6 所示。可以看出,光斑偏移量  $l$  和光程差变化量  $\Delta L$  随着旋转角度的增大而减小,呈线性变化,即旋转平面反射镜出射光斑在旋转初始时偏移量最大,且在旋转过程中光斑沿单一方向运动。

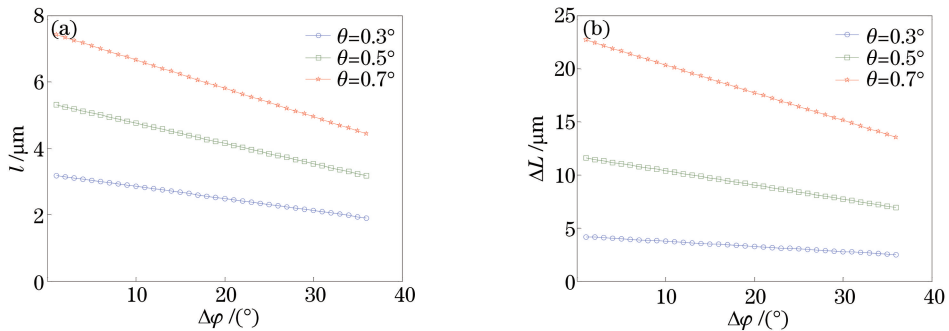


图6 渐开线曲面反射镜倾斜误差分析。(a)旋转平面镜上光斑偏移距离;(b)光程差变化量

Fig. 6 Analysis of tilt error of involute curved-surface-reflector. (a) Displacement of light spot on rotating plane mirror; (b) change of optical path difference

旋转平面反射镜 B 与渐开线曲面反射镜 A 发生相对倾斜时,引起光束发生水平偏移和角度偏转,光束经过空间一定距离传播后经透镜聚焦,接收处光斑的水平偏移和偏移变化量与传播距离和透镜焦距有关。因此,在调节两反射镜倾斜角尽量小的同时,确定合适的聚焦透镜和接收距离可以使接收光斑的水平偏移量减小,以满足光电导天线的尺寸要求。

### 3 实验与分析

验证设计的 ODL 装置是否可用于 THz-TDS 系统,除了验证延迟线装置的性能外,还需要对通过 ODL 装置出射的光斑大小和位置变化进行测量,即考查 ODL 转轴转动到不同位置时出射光束的光斑大小和位置的变化,分析其是否满足使用条件。

### 3.1 测量实验

根据上述对 FODL 装置的误差分析,调节延迟线装置,采用迈克耳孙干涉技术,搭建系统光路如图 7 所示。采用基圆半径  $r=20\text{ mm}$  的渐开线延迟线装置,旋转页面为 4 片,每片旋转平面反射镜长度  $L'=26\text{ mm}$ ,最大有效旋转角度间隔  $\Delta\varphi=38^\circ$ 。电机旋转一周 4 个页面依次引起光程延迟,故扫描频率为转速的 4 倍。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,BS 为分光棱镜, $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  为透镜,D 为 CCD 采集的干涉图像。

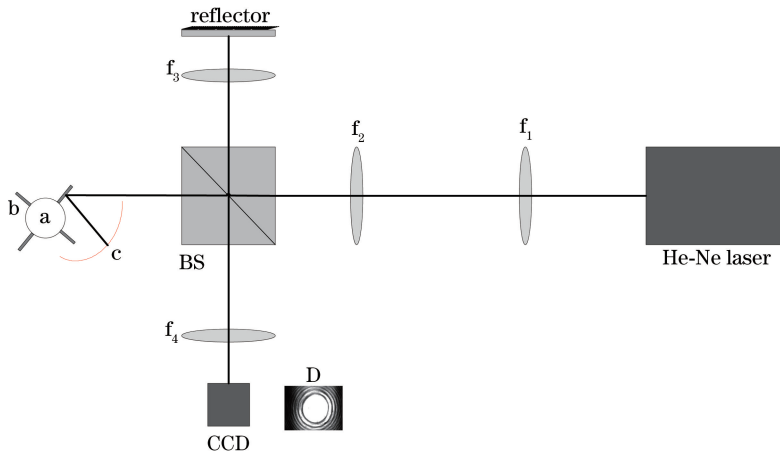


图 7 实验光路图

Fig. 7 Experimental light path diagram

遮挡住固定反射镜光路,单独观察延迟线装置反射镜光路的光斑变化,利用短焦距聚焦透镜(焦距  $f=12\text{ mm}$ )替换  $f_4$  进行聚焦,并利用 CCD 进行接收。编写光斑重心分析程序,分别取渐开线上三个不同位置,计算 CCD 接收处的光斑大小和位置变化,如图 8 所示。

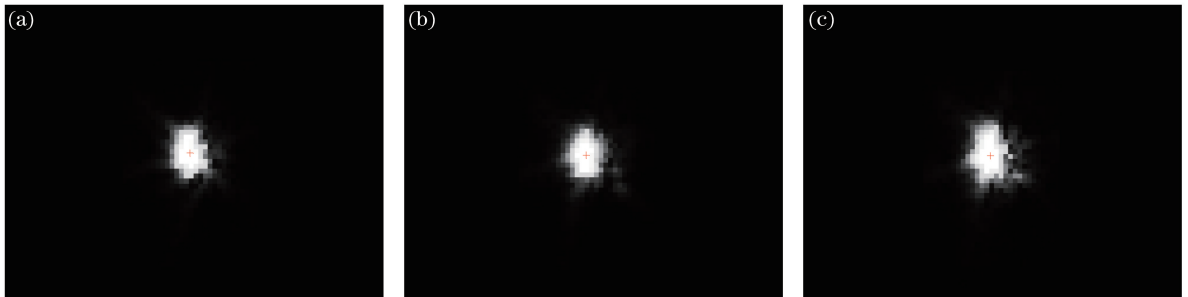


图 8 CCD 接收光斑图。(a)位置 E;(b)位置 F;(c)位置 G

Fig. 8 Light spot images received by CCD. (a) Position E; (b) position F; (c) position G

CCD 像元尺寸为  $6.45\text{ }\mu\text{m}$ ,计算光斑重心位置变化和光斑尺寸,结果见表 1,其中  $\Delta x$  为光斑重心位置横向变化量, $\Delta y$  为光斑重心位置纵向变化量。可以看出光斑重心位置变化量较小,结合理论分析,说明延迟线装置具有较高的装配精度。光斑尺寸大小可通过使用不同焦距的透镜进行改变,由于实际应用中只考虑光斑的横向尺寸,故本实验的测试结果说明该装置能满足间隙大于  $50\text{ }\mu\text{m}$  的光电导天线的要求。

表 1 光斑分析

Table 1 Analysis of light spots

Position	Gravity center $\Delta x / \mu\text{m}$	Gravity center $\Delta y / \mu\text{m}$	Spot size $/\mu\text{m}^2$
E			$38.7 \times 64.5$
F	0.72	8.35	$38.7 \times 64.5$
G	0.58	9.52	$38.7 \times 64.5$

### 3.2 延迟线装置的性能分析

通过上述分析和实验,验证延迟线装置的性能。基于渐开线原理的 FODL 装置的主要性能包括延迟时间、

扫描频率、延迟平稳性和延迟线性度<sup>[13]</sup>。实验采用高速采集系统和硅光电探测器来采集干涉条纹,对采集信号进行处理和计算,分析装置性能。采集信号波形如图 9 所示,其中  $U$  为采集信号的电压幅值。

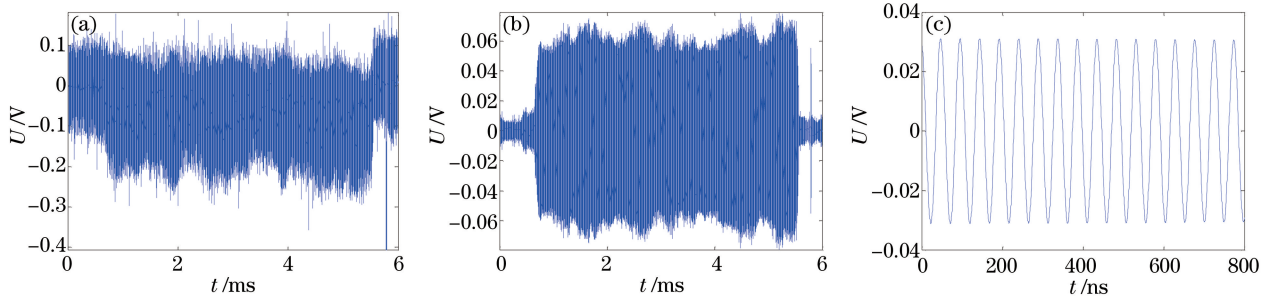


图 9 采集信号波形。(a)原始信号;(b)滤波信号;(c)周期信号

Fig. 9 Waveform of acquired signal. (a) Original signal; (b) filter signal; (c) periodic signal

对原始信号进行滤波处理,计算延迟时间和扫描频率等相关参数,结果见表 2。

表 2 扫描频率和延迟时间分析

Table 2 Analysis of scanning frequency and delay time

Test No.	Number of waveforms	Delay time / $\mu$ s	Delay distance /mm	Actual speed / (r/s)	Scanning frequency /Hz
1	80056	168.87	50.66	25.87	103.5
2	79387	167.45	50.24	25.82	103.3
3	79790	168.31	50.49	26.03	104.2

采用三种方法对其进行平稳性分析:

1) 由表 2 中的实际转速计算出最大误差为 0.81%,描述其转动平稳性误差;

2) 将信号进行傅里叶变换得到其频谱图,如图 10 所示,以最大幅值对应频率为中心频率,以幅值下降一半的最大频率与最小频率之差除以中心频率来描述其转动平稳性误差;

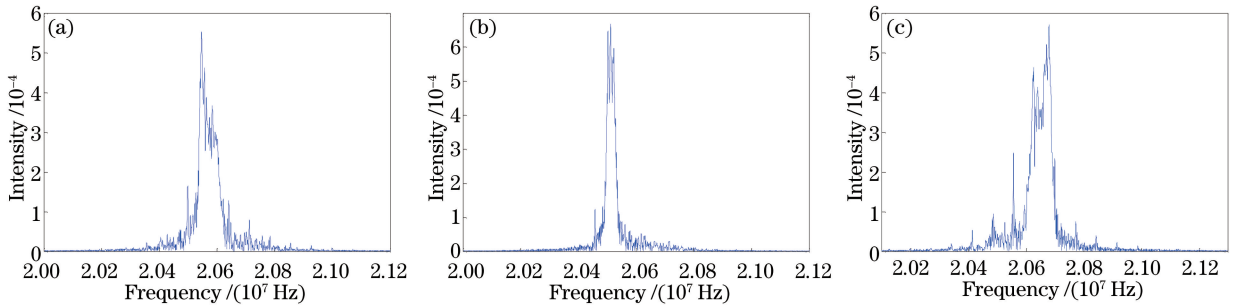


图 10 信号频谱图。(a)测量实验 1;(b)测量实验 2;(c)测量实验 3

Fig. 10 Signal spectra. (a) Test experiment 1; (b) test experiment 2; (c) test experiment 3

3) 使用数学统计方法计算信号周期的方差、标准差以及变异系数,以描述信号周期的变化程度。

方法 2 和方法 3 的结果见表 3。

表 3 平稳性分析

Table 3 Analysis of rotation stability

Test No.	Period /ns	Variance /ns	Standard deviation	Coefficient of variation /%	Stability error /%
1	48.43	0.33	0.68	0.68	0.84
2	48.73	0.18	0.19	0.36	0.25
3	48.32	0.27	0.46	0.56	0.34

同时对延迟线装置的线性度进行分析,由理论可知,在渐开线基圆半径固定时延迟距离  $\Delta L$  只与旋转平面反射镜的旋转角度间隔  $\Delta\varphi$  有关<sup>[13]</sup>,且呈线性关系。本实验的旋转平面反射镜的旋转角度间隔  $\Delta\varphi$  与延迟距离  $\Delta L$  的关系曲线如图 11 所示,可以看出,在高转速实验下线性度误差仅为 0.05%,实验结果与理论分析基本一致。

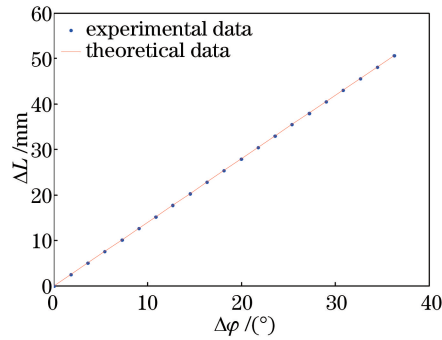


图 11 信号线性度分析

Fig. 11 Analysis of signal linearity

## 4 结 论

针对基于渐开线原理的 FODL 装置,对其机械结构装配误差产生的影响进行了分析。根据理论分析,调节装置和减小装配误差,使得该装置能够满足光电导天线尺寸要求,可以实现高速高稳定性扫描和较大的光学延迟。搭建实验系统进行测量和验证,测得光斑水平偏移量为  $0.58 \mu\text{m}$ , 竖直偏移量为  $8.35 \mu\text{m}$ , 同时能够实现  $100 \text{ Hz}$  的扫描频率和  $167.45 \text{ ps}$  的延迟时间, 具有较好的线性度和平稳性。实验结果表明, 该 FODL 装置通过减小装配误差能够应用于高速扫描 THz-TDS 系统。

## 参 考 文 献

- [1] Huang Zhanhua, Hu Zixiao, He Mingxia, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy rapid data acquisition based on closed-loop control[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040401.  
黄战华, 胡子晓, 何明霞, 等. 基于闭环控制的太赫兹时域光谱快速采集[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040401.
- [2] Hsiung P L, Li X, Chudoba C, *et al.* High-speed path-length scanning with a multiple-pass cavity delay line[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(4): 640-648.
- [3] Qiao Ziwen, Gao Bingrong, Chen Qidai, *et al.* Ultrafast spectroscopy techniques and their complementary usages[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 588-599.  
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]. *中国光学*, 2014, 7(4): 588-599.
- [4] Guerboukha H, Markov A, Qu H, *et al.* Time resolved dynamic measurements at THz frequencies using a rotary optical delay line[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(4): 564-572.
- [5] Edelstein D C, Romney R B, Scheuermann M. Rapid programmable 300 ps optical delay scanner and signal averaging system for ultrafast measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(3): 579-583.
- [6] Probst T, Rehn A, Busch S F, *et al.* Cost-efficient delay generator for fast terahertz imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4863-4866.
- [7] Wang C L, Pan C L. Scanning optical delay device having a helicoid reflecting mirror: US5907423[P]. 1999-05-25.
- [8] Dorney T D. Scanning optical delay line using a reflective element arranged to rotate: US7046412[P]. 2006-05-16.
- [9] Kim G J, Jin Y S, Jeon S Y, *et al.* Rotary optical delay line: US7453619[P]. 2008-11-18.
- [10] Kim G J, Jin Y S, Jeon S Y, *et al.* High speed scanning of terahertz pulse by a rotary optical delay line[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 106102.
- [11] Xu J, Zhang X C. Circular involute stage[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 2082-2084.
- [12] Wang Y, Wang C, Xing Q, *et al.* Periodic optical delay line based on a tilted parabolic generatrix helicoid reflective mirror[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 1998-2005.
- [13] Huang Zhanhua, Liu Yang, He Mingxia, *et al.* Fast optical delay line device based on involute principle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3289-3294.  
黄战华, 刘洋, 何明霞, 等. 基于渐开线原理的快速光学延迟线装置[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3289-3294.