

太赫兹时域光谱系统快速旋转光学延迟线设计

辛胤杰^{1,2}, 李全勇^{1,2*}, 程爽^{1,2}, 蒋锐^{1,2}, 王奇书^{1,2}¹长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;²长春理工大学光电工程学院光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022

摘要 太赫兹时域光谱技术在无损检测领域有很好的技术优势和应用前景,提高系统的检测速度和探测频谱分辨率是当前时域光谱技术的一个重要课题,而太赫兹时域光谱系统的检测速度和延迟时间是由光学延迟线决定的。基于透射式太赫兹时域光谱系统,设计了一种新型的旋转式光学延迟线,该旋转延迟线包含 24 片平面反射镜,通过旋转改变光程,进而产生可变的延迟时间。对该光学延迟线建立了数学模型,并进行了工作状态下光路的仿真与实际实验验证。仿真与实验结果表明,延迟时间可达 72 ps,扫描频率为 60 Hz,最小二乘法计算得到的线性度可达 99.96%。利用有限元分析(FEA)软件对该延迟线的机械结构进行了旋转状态下的受力分析和模态分析,验证了该设计在工作中的可靠性与稳定性。该设计相比现有的太赫兹时域系统中的线性延迟线,有更快的扫描速度和更长的线性延迟时间,有利于太赫兹时域光谱系统的光纤集成化。

关键词 测量; 太赫兹时域光谱技术; 光学延迟线; 等效采样; 延迟距离; 延迟时间

中图分类号 TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0614001

1 引言

太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术是一种新兴的有效的相干探测技术。因为太赫兹辐射具有能量低和指纹性等独有特性^[1],所以太赫兹时域光谱技术有着非常广泛的应用前景。红外傅里叶变换光谱 (FTIR) 技术、拉曼光谱技术和 X 射线衍射等传统技术存在光谱分辨率低、散射明显、热背景噪声敏感等缺点^[2],太赫兹时域光谱技术能够很好弥补以上缺点,在生物化学^[3-5]、无损检测^[6-7]和医学^[8-9]等领域发挥了不可替代的作用,从而成为科学研究的热点。

图 1 为使用旋转延迟线的光纤式 THz-TDS 系统示意图,这种系统具有典型 THz-TDS 系统不具备的集成化、小型化的优点。为了实现太赫兹时域光谱系统快速扫描、小型化和集成化的需求,需要在太赫兹时域光谱系统中使用光纤系统以减小使用环境对光路的影响。系统中的光学延迟线是太赫兹时域光谱系统中的一个组成部分,用于改变光程,以实

现时域信号的探测^[10]。

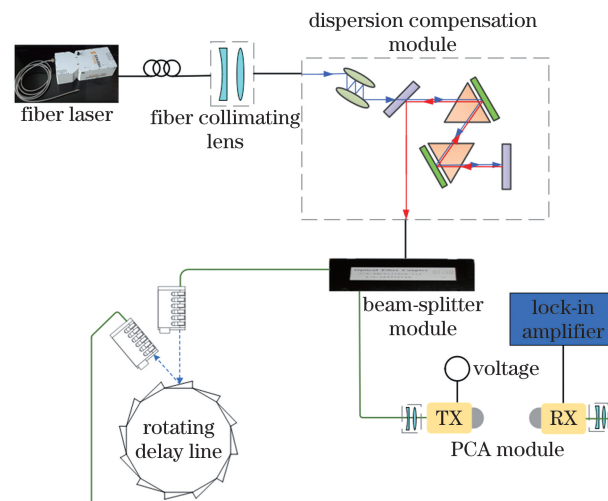


图 1 光纤式太赫兹时域光谱系统

Fig. 1 Optical fiber terahertz time-domain spectroscopy system

太赫兹时域光谱系统中进入光电导天线模组 (PCA) 发射端 (TX) 的激光脉冲为飞秒脉冲,但探测器 (RX) 的响应时间为亚纳秒,通过使用光学延迟线

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-12; 录用日期: 2021-08-03

基金项目: 吉林省科技资源开放共享服务平台与科研条件保障项目(20191004022TC)

通信作者: *liquanyong@cust.edu.cn

来改变脉冲间的时间延迟,将高频飞秒脉冲产生的重复信号变为低频信号并进行处理,探测器对重复信号进行多次采样,实现等效采样。

在过去的实验研究中,典型 THz-TDS 系统的光学延迟线为步进电机驱动的反光镜^[11]。这种延迟线能产生纳秒或亚纳秒的延迟时间,但有扫描频率低、信号重建时间长的缺点。为了解决这种缺点,Kitahara 等^[12]提出了基于振镜阵列反射的光学延迟线,该设计可以实现在 15~200 ps 范围内变化的时间延迟;Jin 等^[13]设计了一种振荡光学延迟线,可以在延迟时间 60 ps、扫描频率 30 Hz 的状态下稳定工作,但线性度较差;赵新才等^[14]设计了滚珠丝杠驱动角锥棱镜的精密光纤延迟线,延迟时间可达 480 ps;黄战华等^[15]设计了基于渐开线原理的旋转光学延迟线,能实现 133.4 ps 的延迟时间和 20 Hz 的扫描频率。近几年,利用相位差产生延迟的光学延迟线或相干探测方法^[16-18]被提出,但这些方法的产品化和集成化需要极高的成本且难度大。

针对光纤 THz-TDS 系统,基于 Chen 等^[19-20]提出的高速线性光学延迟线技术,设计了一种适用于光纤式 THz-TDS 的快速旋转光学延迟线,并对该装置进行了仿真、误差分析和测试实验,测量了出射光束质量和工作稳定性。经分析,当稳定工作的电机转速为 3600 r/min 时,该快速旋转光学延迟线的延迟时间可达 72 ps,扫描频率为 60 Hz。经过实验验证,该光学延迟线装置符合太赫兹时域光谱系统对光束质量的要求。该旋转光学延迟线具有较长的延迟时间,同时可达高重复频率,相对其他线性延迟线,更适用于太赫兹时域光谱系统的快速扫描。

2 快速旋转光学延迟线的设计和实验

2.1 快速旋转光学延迟线的基本参数

快速旋转光学延迟线(FRODL)的基本设计结构如图 2 所示,延迟线由一个半径为 R 的基圆和围绕基圆的反射镜(n 片)阵列组成,反射镜与基圆切线的夹角为 α ,每片反射镜相对于基圆圆心的张角为 θ 。

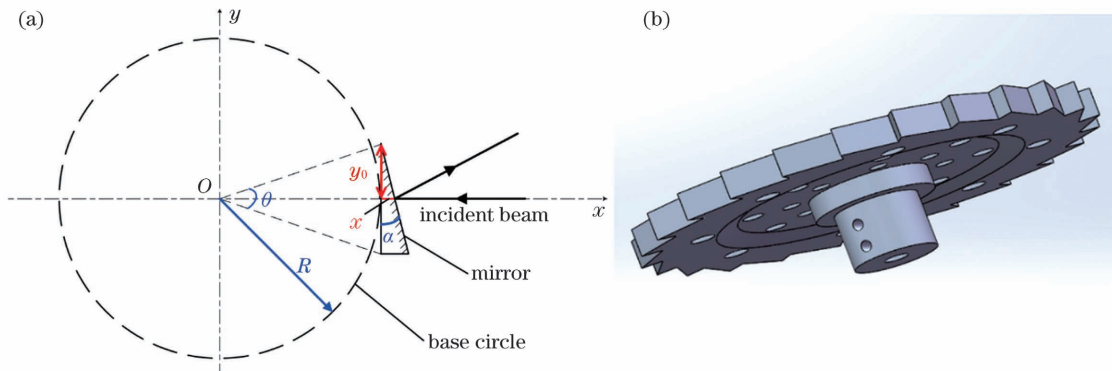


图 2 快速旋转光学延迟线结构。(a)原理图;(b)三维模型

Fig. 2 Structure of fast rotating optical delay line. (a) Principle diagram; (b) 3D model

旋转延迟线工作时为顺时针旋转,令延迟线旋转角度为 δ ,每旋转 δ 角,光程在单片反射镜上会产生径向和切向两个距离变化量 a 和 b :

$$a = \frac{b}{\tan \alpha}, \quad (1)$$

$$b = \begin{cases} \frac{R \tan \alpha \tan \delta [1 + \tan(\theta/2) \cdot \tan \alpha]}{1 - \tan \alpha \tan \delta}, & \delta > 0 \\ \frac{y_0 (R + x) \tan \alpha \tan |\delta|}{y_0 + x \tan |\delta|}, & \delta < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: θ 是反射镜相对基圆的圆心角; y_0 是反射镜在切线上投影长度的一半; x 是旋转角 $\delta=0$ 时反射镜与其在切线上投影的距离;

$$x = R \tan(\theta/2) \tan \alpha. \quad (3)$$

则延迟距离 Δl 可表示为

$$\Delta l = \begin{cases} (R + x) - \frac{R + x + b}{\cos \delta}, & \delta > 0 \\ (R + x) - \frac{R + b}{\cos \delta}, & \delta < 0 \end{cases}. \quad (4)$$

因此,延迟距离 Δl 对应的延迟时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c}, \quad (5)$$

式中: c 为光速。

根据(4)式对不同旋转延迟线的 R 、 α 和 θ 分别进行计算,得到以上变量对延迟距离 Δl 的影响规律,如图 3 所示。并根据最小二乘法计算了不同参

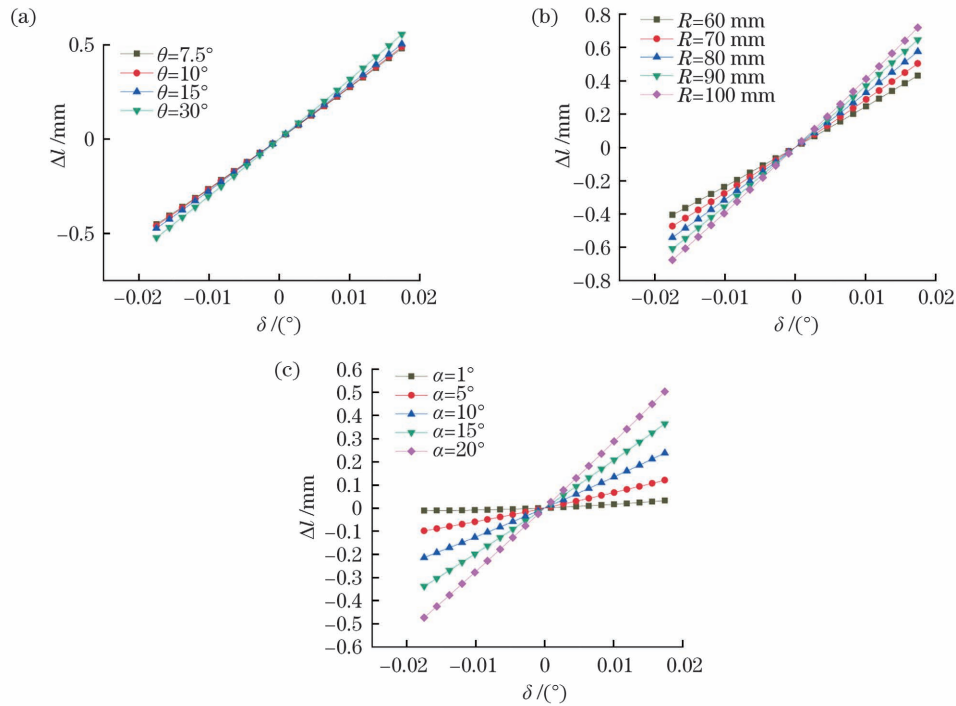


图 3 不同参数对延迟距离的影响。(a) θ ;(b) R ;(c) α

Fig. 3 Influence of different parameters on delay distance. (a) θ ; (b) R ; (c) α

数下延迟时间的线性度:

$$r = \frac{\overline{\Delta l \cdot \delta} - \overline{\Delta l} \cdot \overline{\delta}}{\sqrt{(\overline{\delta^2} - \overline{\delta}^2)(\overline{\Delta l^2} - \overline{\Delta l}^2)}} \quad (6)$$

由图 3(a)可以看出,在 $R=70 \text{ mm}, \alpha=20^\circ$ 的情况下,当 θ 从 7.5° 增大至 30° 时,延迟距离增大的幅度并不明显,而反射镜个数会因反射镜圆心角 θ 的增大而减少,导致延迟时间窗口变短。由图 3(b)可

以看出,在 $\theta=15^\circ, \alpha=20^\circ$ 的情况下,延迟距离随 R 的增大而增大,但过大的 R 会影响延迟线的工作转速,并给驱动电机带来负担,增加加工难度。由图 3(c)可以看出,在 $R=70 \text{ mm}, \theta=15^\circ$ 的情况下,延迟距离随着反射镜倾角 α 的增大而增大,但当 α 过小时,延迟时间的非线性效应非常明显,当 $\alpha=1^\circ$ 时,线性度为 96.82%。各反射镜偏角 α 的线性度如表 1 所示。

表 1 α 对线性度的影响

Table 1 Influence of α on linearity

$\alpha / (^\circ)$	1	5	10	15	20
Linearity / %	96.82	99.46	99.86	99.94	99.96

因此,根据上述数学建模,该快速旋转光学延迟线选取偏角 $\alpha=20^\circ$,基圆半径 $R=70 \text{ mm}, \theta=15^\circ$ 的三维外形参数。在此模型下,根据(4)、(5)式可得该光学延迟线的总延迟时间 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{n}{c} \times \Delta l = \frac{n}{c} \times \left[2(R+x) - \frac{R+x+b}{\cos \delta} - \frac{R+b}{\cos(-\delta)} \right] \quad (7)$$

经计算可知,该延迟线可以实现延迟时间为 72 ps 的扫描窗口。

2.2 快速旋转光学延迟线的仿真与实验

在光学仿真软件中对快速旋转光学延迟线进行了光线追迹模拟,模拟使用 632 nm 的近轴高斯光束光源,在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 五个等分角度(β)的工作位置对延迟线单片反射镜进行了模拟,仿真软件中的模拟结构如图 4 所示。

对快速旋转光学延迟线进行了光束质量的测试实验,如图 5 所示,使用 CCD 相机采集了工作状态下旋转光学延迟线单片反射镜从 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 五个等分角度出射的出射光光斑,并分析了光斑的光束质量和出射光位置的偏移情况。测试实验使用波长为

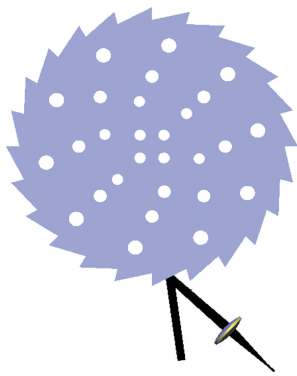


图 4 光学仿真结构示意图

Fig. 4 Schematic of optical simulation structure

632 nm 的半导体激光器,出射光纤准直器的通光孔径为 1.8 mm。

3 结果与分析

3.1 仿真与实验结果

图 6(a)~(e)分别为 LightTools 接收器接收到

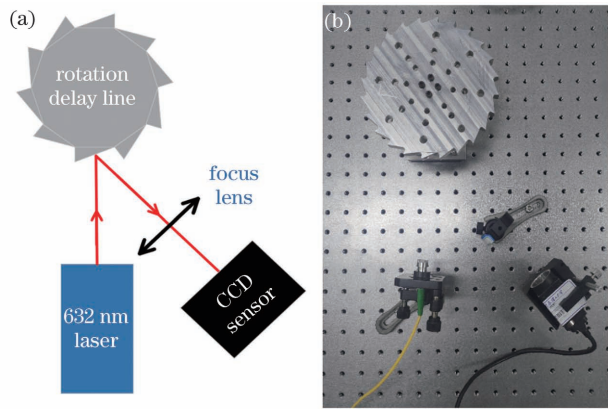


图 5 实验装置。(a)示意图;(b)实验图

Fig. 5 Experimental setup. (a) Schematic; (b) experimental picture

的 -1° 、 -0.5° 、 0° 、 0.5° 和 1° 位置处的工作状态光斑,光斑半径最大为 0.8 mm,光斑横向位移最大为 1.328 mm。该仿真结果显示,延迟线出射的光束光斑无明显形变,光束能量集中。在实验中使用了耦合器,其通光孔径为 1.8 mm,有利于后续光纤光路的耦合。

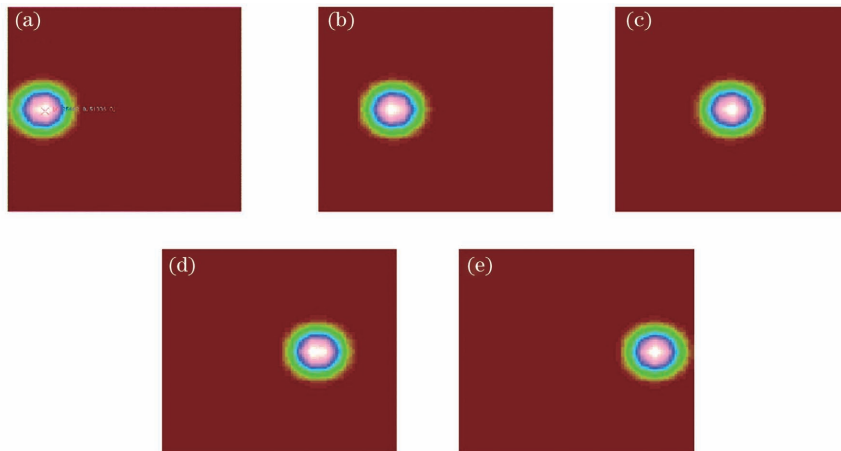


图 6 不同位置处的工作状态光斑。(a) $\beta=-1^\circ$;(b) $\beta=-0.5^\circ$;(c) $\beta=0^\circ$;(d) $\beta=0.5^\circ$;(e) $\beta=1^\circ$

Fig. 6 Light spots at different positions. (a) $\beta=-1^\circ$; (b) $\beta=-0.5^\circ$; (c) $\beta=0^\circ$; (d) $\beta=0.5^\circ$; (e) $\beta=1^\circ$

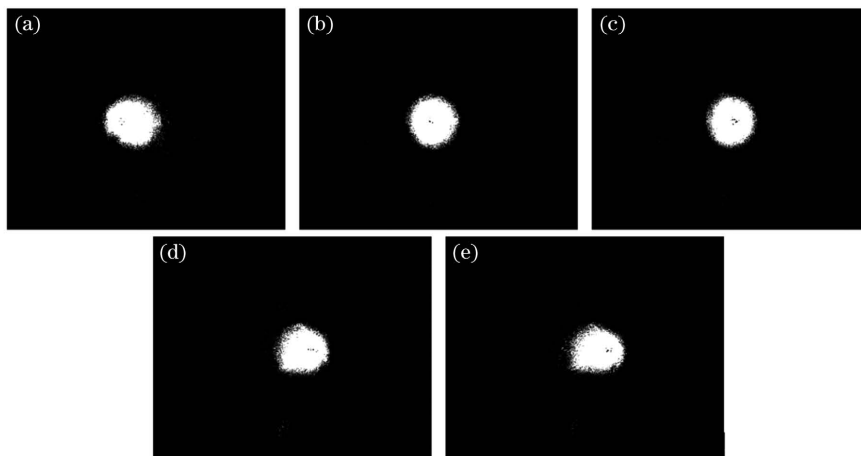


图 7 不同位置处的出射光光斑。(a) $\beta=-1^\circ$;(b) $\beta=-0.5^\circ$;(c) $\beta=0^\circ$;(d) $\beta=0.5^\circ$;(e) $\beta=1^\circ$

Fig. 7 Exit light spots at different positions. (a) $\beta=-1^\circ$; (b) $\beta=-0.5^\circ$; (c) $\beta=0^\circ$; (d) $\beta=0.5^\circ$; (e) $\beta=1^\circ$

图 7(a)~(e) 为延迟线工作状态下 CCD 相机采集到的 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 位置处的出射光光斑。该 CCD 相机的像元尺寸为 $5.2 \mu\text{m}$, 成像幅面大小为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。通过编程进行光斑图像处理, 计算出了光斑面积和光斑形心的偏移量。表 2 为各角度光斑的面积大小和位置变化。最大位置偏移为 0.3328 mm , 光斑最大面积为 1.118 mm^2 。结果表明, 在工作状态下, 该快速旋转光学延迟线的出射光光斑位移较小, 光斑形变较小且光斑能量集中, 可在后续准直和聚焦光路的调整下, 达到光纤耦合模块入射光的要求, 符合光纤式太赫兹时域光谱系统后续光路的设计要求。

3.2 快速旋转光学延迟线的误差分析

在 2.1 节中对该延迟线进行了理想状态下各项

表 2 快速旋转光学延迟线的光束质量

Table 2 Beam quality of fast rotating optical delay line

$\beta / (^\circ)$	Beam size / mm^2	Offset / mm
-1.0	1.1180	-0.3328
-0.5	1.0429	-0.1352
0	0.9904	0
0.5	1.0203	0.2340
1.0	1.0278	0.2808

参数的计算, 但在该光学延迟线实际装配过程中, 转轴和入射光之间会产生装配误差。根据该快速旋转光学延迟线的结构进行误差分析, 加工和装配过程中产生的误差可分为偏心误差和入射角误差两种。偏心误差又根据 x 、 y 轴两个方向分为横向偏心误差 Δx 和纵向偏心误差 Δy , 如图 8 所示。

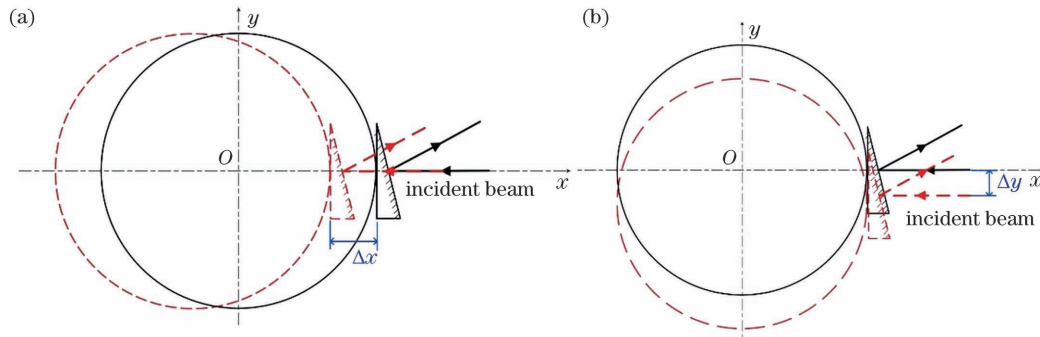


图 8 不同偏心误差示意图。(a) 横向偏心; (b) 纵向偏心

Fig. 8 Schematics of different eccentricity errors. (a) Horizontal eccentricity; (b) vertical eccentricity

旋转角 $\delta = 0$ 时, 反射镜切线投影半长度 (y_0) 和其与反射镜的距离 (x_0) 分别为

$$y_0 = R \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (8)$$

$$x_0 = y_0 \tan \alpha. \quad (9)$$

纵向偏心误差 Δy 会导致入射光初始位置发生横向位移, 如图 9 所示, 该位移设为 ΔX , 根据三角形边角关系, 有

$$\frac{x_0 + \Delta X}{a} = \frac{y_0 + \Delta y}{b}, \quad (10)$$

$$\frac{b}{R + x_0 + \Delta X + a} = \tan \delta. \quad (11)$$

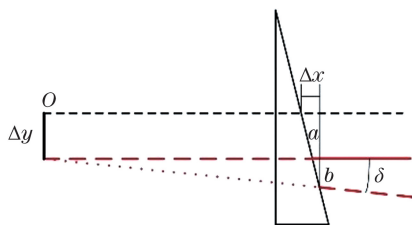


图 9 Δy 的示意图

Fig. 9 Schematic of Δy

由(10)、(11)式可求得在有 Δy 的情况下旋转角 δ 产生的水平和垂直距离的变化分量, 即(1)、(2)式中的 a 和 b 。

最后可得纵向偏心误差 Δy 情况下延迟距离变化量 $\Delta l'$:

$$\Delta l' = (R + x_0 + \Delta X + a) - \sqrt{(R + x_0 + \Delta X + a)^2 + b^2}. \quad (12)$$

由此可知, 纵向偏心会给快速旋转光学延迟线带来额外的非线性误差。

横向偏心误差 Δx 是在入射光线方向发生的位移变化, 不会对旋转产生额外的位移量, 因此横向偏心对旋转光学延迟线产生的可变化的延迟时间没有影响, 只会导致出射光的平移, 带来相应的出射偏移 $\Delta l''$ 。该偏移量仅由 Δx 决定:

$$\Delta l'' = \Delta x. \quad (13)$$

入射角误差是由于入射光没有正入射延迟线初始位置。延迟线本质上是平面镜的反射, 因此出射角会随入射角的变化而变化。设入射角误差为 δ' , 则有

$$\Delta l' = \Delta l \times \cos \delta' = \begin{cases} \cos \delta' \left[\frac{R+x+b}{\cos \delta} - (R+x) \right], & \delta > 0 \\ \cos \delta' \left[\frac{R+b}{\cos \delta} - (R+x) \right], & \delta < 0 \end{cases} \quad (14)$$

因此,在有入射角误差的情况下,实际的延迟距离为原始延迟距离与误差偏角的余弦乘积,即实际入射距离在理想入射方向的投影距离。

3.3 快速旋转延迟线的稳定性分析

当快速旋转光学延迟线正常工作时,单片反射镜的正常的工作区域的旋转角 δ 为 $\pm 1^\circ$,在两相邻反射镜之间会有 $\delta = 13^\circ$ 的非工作区域,这段区域对应的时间称为“空闲时间”,每段“空闲时间”应为扫描窗口的整数倍,以保证延迟时间的连续性。当稳定

工作的电机的转速为 3600 r/min,即角速度为 $\omega = 120\pi$ rad/s 时,扫描频率约为 60 Hz,每段“空闲时间”约为 6.019 ms,因此,该装置对工作状态下的高速和高稳定性是有较高要求的。另外,光学延迟线要求稳定的工作环境以达到高精度的延迟时间,且该快速旋转光学延迟线需要在电动机工作转速为 3600 r/min 的高速状态下工作,这会带来机械元件的振动和共振。综上,需要对该装置在工作时的受力情况进行模态分析,求解出该装置的固有振动频率。

有限元分析软件的模态分析参数设定如下:转盘材料选取铝合金,密度 $\rho = 0.0027$ g/mm³,弹性模量为 7.1×10^{10} Pa,泊松比为 0.33。使用分块兰索斯(Block Lanczos)模态提取方法,进行旋转状态下预应力的静态分析,默认网格划分设置,设置零位移约束,忽略非线性效应。模态分析结果如图 10 所示。

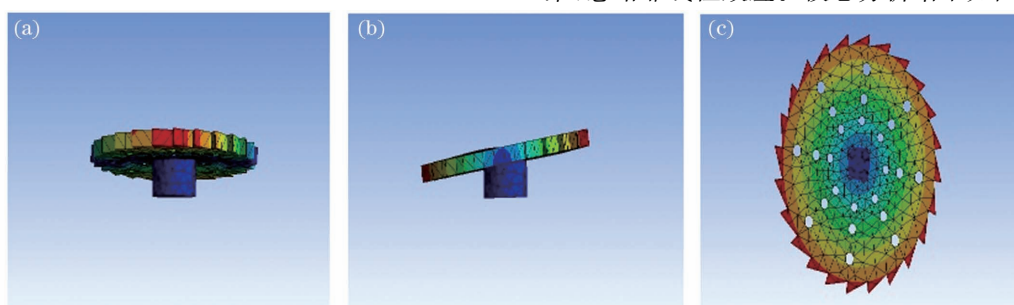


图 10 机械结构的有限元分析。(a) 1 阶模态;(b) 2 阶模态;(c) 3 阶模态

Fig. 10 Finite element analysis of mechanical structure. (a) 1st order mode; (b) 2nd order mode; (c) 3rd order mode

图 10(a)~(c)为快速旋转光学延迟线的前三阶模态模拟图,是不同模态下装置的不同振型,1 阶模态为旋转延迟线相对转轴的 x 方向倾斜,2 阶模态为旋转光学延迟线相对转轴的 y 方向倾斜,3 阶模态为旋转光学延迟线基圆径向的拉伸。

1~6 阶模态的阻尼振动频率柱状图如图 11 所示。可以看出,该装置的最小阻尼频率为 926.16 Hz,而驱动旋转延迟线的伺服电机的工作频率为 60 Hz,

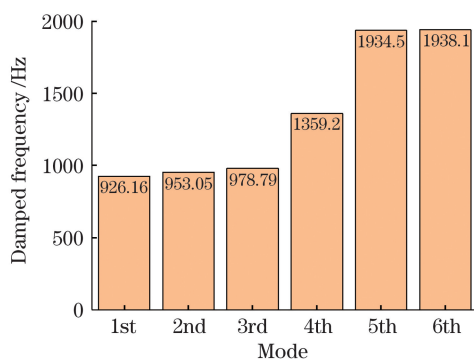


图 11 不同模态的阻尼振动频率柱状图

Fig. 11 Damped oscillation frequency histogram for different modes

伺服电机不会与延迟线发生共振,因此不会影响延迟线的正常工作或对延迟线产生破坏性的影响。

4 结 论

基于用于光学相干层析的光学延迟线技术,提出了适用于 THz-TDS 的快速旋转光学延迟线,该光学延迟线可以提供 72 ps 的时间延迟、60 Hz 的扫描频率。对该装置进行了光学设计软件的仿真,并进行了光斑的质量分析。搭建了测试实验,对快速旋转光学延迟线进行了工作状态下的出射光光束质量分析。实验结果表明,光斑最大偏移量为 0.3328 mm,小于软件模拟结果,符合设计和工作要求。对其机械结构进行了有限元模态分析和实际安装过程中的误差分析,分析证明该装置可以实现高速下的稳定工作,产生稳定的光学延迟。该光学延迟线更适用于光纤光路,相对于线性光学延迟线,更有利于 THz-TDS 系统的小型化和集成化。同时,该旋转光学延迟线可在较长的延迟时间下达到高重复频率,相对其他线性延迟线,更适用于太赫兹时域光谱系统的快速扫描。

参 考 文 献

- [1] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology[M]. Cui W Z, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
李允植. 太赫兹科学与技术原理[M]. 崔万照, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] Liu J. Research on the key techniques of fiber-based terahertz time-domain spectroscopy and imaging[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
刘佳. 光纤集成化太赫兹时域光谱成像关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [3] Yin M, Wang J L, Huang H L, et al. Research on flavonoids based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 3919-3924.
殷明, 王建林, 黄浩亮, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的黄酮类化合物研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3919-3924.
- [4] Liu L Y, Chang T Y, Li K, et al. Spectral analysis and quantitative detection of baicalin based on terahertz radiation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0314001.
刘陵玉, 常天英, 李珂, 等. 基于太赫兹辐射的黄芩苷光谱分析及定量检测[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0314001.
- [5] Luo L C, Deng H, Liu Q C, et al. Ammonium perchlorate water content prediction models based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1130001.
罗力川, 邓琥, 刘泉澄, 等. 基于太赫兹光谱的高氯酸铵含水率预测模型[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1130001.
- [6] Yang X W, Zhang D H, Liu S Y, et al. Terahertz nondestructive detection of the hidden layer in multilayer medium[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0312001.
杨秀蔚, 张德海, 刘锶钰, 等. 多层介质中隐含层的太赫兹无损检测[J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0312001.
- [7] Zhang D D, Ren J J, Li L J, et al. Terahertz non-destructive testing technology for glass fiber honeycomb composites [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 0212002.
张丹丹, 任姣姣, 李丽娟, 等. 玻璃纤维蜂窝复合材料的太赫兹无损检测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0212002.
- [8] Zhu Y M, Shi C J, Wu X, et al. Terahertz spectroscopy algorithms for biomedical detection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0130001.
朱亦鸣, 施辰君, 吴旭, 等. 生物医学检测中太赫兹光谱技术的算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0130001.
- [9] Wang P, He M X, Li M, et al. Application of terahertz spectroscopy in the detection of bioactive peptides [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(9): 2696-2701.
王璞, 何明霞, 李萌, 等. 太赫兹光谱技术在生物活性肽检测中应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2696-2701.
- [10] Neu J, Schmuttenmaer C A. Tutorial: an introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(23): 231101.
- [11] Vieweg N, Rettich F, Deninger A, et al. Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(10): 823-832.
- [12] Kitahara H, Tani M, Hangyo M. High-repetition-rate optical delay line using a micromirror array and galvanometer mirror for a terahertz system [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80: 076104.
- [13] Jin Y S, Jeon S G, Kim G J, et al. Fast scanning of a pulsed terahertz signal using an oscillating optical delay line[J]. The Review of Scientific Instruments, 2007, 78(2): 023101.
- [14] Zhao X C, Tao S X, Liu N W, et al. Design and experimental verification of precision optical fiber delay line [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2622-2626.
赵新才, 陶世兴, 刘宁文, 等. 精密光纤延迟线的设计及实验验证[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2622-2626.
- [15] Huang Z H, Yang Z J, Cai H Y, et al. Optical delay line device with high speed and high stability [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031202.
黄战华, 杨振京, 蔡怀宇, 等. 高速高稳定性光学延迟线装置[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031202.
- [16] Urbanek B, Möller M, Eisele M, et al. Femtosecond terahertz time-domain spectroscopy at 36 kHz scan rate using an acousto-optic delay[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(12): 121101.
- [17] Sun H, Wang Y, Chen L R. Integrated discretely tunable optical delay line based on step-chirped subwavelength grating waveguide Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5551-5560.
- [18] Fang D J, Tong X L, Zhang C, et al. High-speed swept laser source based on optical buffer device within ring cavity [J]. Laser & Optoelectronics

Progress, 2020, 57(1): 011407.

方定江, 童杏林, 张翠, 等. 基于环腔内光学缓存装置的高速扫频激光光源[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011407.

[19] Chen N G, Zhu Q. Rotary mirror array for high-

speed optical coherence tomography [J]. Optics Letters, 2002, 27(8): 607-609.

[20] Liu L B, Chen N G. Double-pass rotary mirror array for fast scanning optical delay line [J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5426-5431.

Design of Fast Rotating Optical Delay Line for Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Xin Yinjie^{1,2}, Li Quanyong^{1,2*}, Cheng Shuang^{1,2}, Jiang Rui^{1,2}, Wang Qishu^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education, College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract

Objective The terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) technology has superior technical advantages and application prospects in the field of non-destructive testing. Improving detection speed and detection spectral resolution is an important topic of current time-domain spectroscopy technologies. The detection speed and the delay time of a terahertz time-domain spectroscopy system are determined by the optical delay line. The laser in the THz-TDS system is a femtosecond pulse, but the response time of the detector is about sub-nanosecond. By modifying the time delay between pulses, the repeating signal generated by the high frequency femtosecond pulse is converted to a low frequency signal for processing, so that the detector can sample the repeating signals for multiple times to realize equivalent sampling. In this paper, a high-speed linear optical delay line, used in optical coherence tomograph (OCT), is designed for a fiber THz-TDS system. The analysis of delay line is carried out for optical simulation, error analysis, and test experiments, and the quality and working stability of the exit beam are measured.

Methods A fast rotation optical delay line (FRODL) is made of aluminum alloy. Its mathematical model consists of a base circle and a mirror array with 24 plane mirrors, and the laser is incident to the center of the mirror along the center of the base circle. After reflection from the mirror, it enters into the collimating focusing mirror and is coupled into the optical fiber. When the rotating delay line is working, a horizontal distance change and a vertical distance change are generated on the mirror. So, the optical path change can be described by these variables. First, the influence of different variables on delay time is analyzed by a mathematical analysis software, and the linearity of delay time is calculated. Second, the optical simulation software LightTools is used to simulate the laser path and the beam quality under different angles of working situation. In the simulation, the laser wavelength is 635 nm and the beam diameter is 1.8 mm. Third, the beam quality of the fast rotating optical delay line is tested. The experiment uses a semiconductor laser with a wavelength of 632 nm, and the fiber collimator clear aperture is 1.8 mm. Finally, using the finite element analysis (FEA) software, the force and modal analysis of the mechanical structure of the delay line are carried out in the rotating state.

Results and Discussions According to the analysis based on the mathematical model, the linearity of the optical delay line is the highest, reaching 99.96%, when the angl of the optical delay line mirror is 20°, and the delay time can achieve 72 ps. The simulation results of LightTools show that the biggest beam spot radius is 0.8 mm, the exit beams of the delay line have no significant deformation, and the beam energy is concentrated (Fig. 6). The experimental results show that the maximum offset of the beam is 0.3328 mm, and the maximum area of the spot is 1.118 mm² (Fig. 7). Whereas the clear aperture of the coupler used for the experiment is 1.8 mm, the results can meet the requirements of the incident light of the fiber coupling module and the design requirements of the subsequent optical system. The modal analysis results show the inherent frequency of the top six-order modality (Fig. 11). The minimum damped frequency of the FRODL is 926.16 Hz, while the working frequency of the servo motor driving the rotating delay line is 60 Hz. The servo motor will not resonate with the delay line, so it will not

affect the normal operation of the delay line or have destructive effects on the delay line.

Conclusions Based on the transmission terahertz time domain spectral system, a novel rotating optical delay line is designed. The rotating optical delay line contains 24 planar mirrors, which can change the optical path by rotating to produce a variable time delay. A mathematical model of the optical delay line is established, and the optical path simulation and the actual experimental verification under working conditions are carried out. Simulation and experimental results show that the delay time can reach 72 ps, the scanning frequency is 60 Hz, and the linearity calculated by the least square method can reach 99.96%. Using the finite element analysis software, the force and modal analysis of the mechanical structure of the delay line are carried out in the rotating state, which ensure the reliability and stability of the design in work. Compared with the linear delay line in the existing terahertz time domain system, this FRODL has a fast scanning speed and linear delay time. The FRODL is more suitable for fiber optical systems, which has great advantages of miniaturization and integration of the THZ-TDS system relative to linear optical delay lines.

Key words measurement; terahertz time-domain spectroscopy technology; optical delay line; equivalent sampling; delay distance; delay time