

激光与光电子学进展

渐开线反射面光学延迟线的仿真和误差分析

辛胤杰^{1,2}, 李全勇^{1,2*}, 孙伟², 王奇书^{1,2}, 王文博^{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, 吉林 长春 130022

摘要 太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术作为一种新兴的相干探测技术, 其发展推动着安全检测和无损检测技术的进步与革新, 对保护人们的生命健康、财产安全有着突出的贡献。为了获得更好的成像效果与探测灵敏度, 就应在保证获取信号的信噪比符合要求的同时提高对太赫兹信号的探测速度。本文基于渐开线反射面光学延迟线装置, 分析了光学延迟线外形参数, 对延迟距离为 71 mm、延迟时间为 236.7 ps 的模型进行了仿真。针对旋转反射镜轴心的偏心误差、平面反射镜的安装误差和旋转光学延迟线的出射光斑畸变三个方面进行了误差分析, 并讨论了减小误差的方法。为该装置提升时间延迟、获得更加完整的太赫兹光谱, 以及进一步提升 THz-TDS 系统的性能提供理论和仿真基础。

关键词 仪器, 测量与计量; 太赫兹时域光谱系统; 渐开线; 光学延迟线; 延迟时间

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2312004

Simulation and Error Analysis of Involute Reflector Optical Delay Line

Xin Yinjie^{1,2}, Li Quanyong^{1,2*}, Sun Wei², Wang Qishu^{1,2}, Wang Wenbo^{1,2}

¹Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract As an emerging coherent detection technology, terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) technology has promoted the progress and innovation of safety testing and nondestructive testing technologies, and has made outstanding contributions to the protection of people's life and health and property safety. In order to obtain better imaging results and detection sensitivity, it is necessary to increase the detection speed of terahertz signals while ensuring that the signal-to-noise ratio of the acquired signal meets the requirements. Based on the involute reflector optical delay line device, this paper analyzes the optical delay line shape parameters, and simulates a model with a delay distance of 71 mm and a delay time of 236.7 ps. The error analysis is made in three aspects: the eccentric error of the axis of the rotating mirror, the installation error of the planar mirror, and the outgoing spot distortion of the rotating optical delay line, and the method of reducing the error is discussed. It provides a theoretical and simulation basis for the device to increase the time delay, obtain a more complete terahertz spectrum, and further improve the performance of the THz-TDS system.

Key words instruments, measurement, and metrology; terahertz time domain spectroscopy system; involute; optical delay line; delay time

1 引言

太赫兹 (THz) 波是处于微波和红外之间的一个特殊的波段, 因此 THz 波同时具有了电子学和光学的特性, 也使得 THz 波具有强穿透性^[1]、安全性^[2]和指纹

性^[3]等独特优越性。近年来, 超快光学的发展使产生 THz 波的问题得到突破, THz 技术在此基础上得以迅速发展^[4], 特别是太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术^[5]。THz-TDS 通过飞秒激光器和光电导天线产生 THz 波, 对 THz 波进行等效采样和傅里叶变换后获得被测

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-06-13

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

物的 THz 光谱,将光谱导入到计算机进行处理分析^[6-7],即可获取被测样品的光学参数,将这些参数进行进一步分析就可得到被测样品的结构信息和物质组成。

在典型的 THz-TDS 系统中,光学延迟线装置可以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,这种技术的特点是在低成本的同时保证了可靠性,但该方法的 THz 脉冲重建速度极慢,单个信号扫描时间达数秒,这阻碍了 TH-TDS 在现实生活中的推广。为解决这样的问题,Khurgin^[8]提出了一种基于耦合谐振腔线性绝热区折叠的可调谐光延迟线;Xu 等^[9]提出了一种圆形渐开线型光学延迟装置实现纳秒级时间延迟;Wang 等^[10]提出一种回转螺旋面反射镜的光学延迟线装置,实现了全反射式周期性扫描光学延迟线;Huang 等^[11-12]在渐开线原理的基础上,设计出一种可快速扫描的基于渐开线原理的光学延迟线装置,能够实现皮秒级的时间延迟;Xu 等^[13]提出了新型的渐开线光延迟线设计方案,提升了系统的时间分辨率;茆亚洲等^[14]、辛胤杰等^[15]提出的新型光学延迟线,拥有模块化的优点;黎小妹等^[16]、葛本安等^[17]分别提出适用于光纤系统的线性光学延迟线设计,提高了系统的稳定性。

与常用的线性位移台延迟线相比,上述各种原理的旋转延迟线虽在工作稳定性和线性度等方面仍有不足,但可产生最长达纳秒级的延迟时间,扫描频率从几十赫兹到上百赫兹不等,相对于线性位移台延迟线均有不同程度的提高,使得 THz-TDS 系统进行快速扫描成为可能。为提高 THz-TDS 的探测速度和产生更加准确的延迟时间,本文基于渐开线反射面光学延迟线装置,使用 LightTools 软件对渐开线反射面旋转光学延迟线的外形参数进行了光路仿真,并对该种旋转光学延迟线的出射光光束质量和安装误差状态下出射光的光束质量进行了基于照度图的仿真分析。

2 渐开线反射面光学延迟线的仿真

2.1 光学延迟线的数学建模

渐开线反射面光学延迟线装置的原理如图 1 所示:光束沿水平的基圆切线方向 AB 入射到沿基圆的旋转反射镜 MN 上,光在旋转反射镜上反射,沿渐开线基圆的切线方向 QP 至渐开线反射镜 AP 返回,根据渐开线产生原理,光束沿渐开线反射面的法线方向入射,所以光将沿原路径反射。旋转反射镜 MN 工作时处于不同位置,即入射角 φ 改变时,对应着入射到渐开线反射面的位置不同,从而改变光束在装置中的光程,旋转反射镜单个镜片的旋转周期即为延迟线产生的延迟时间。

H 点可用参数方程表示为

$$\begin{cases} x_H = -r \cos 2\varphi \\ y_H = r \sin 2\varphi \end{cases} \quad (1)$$

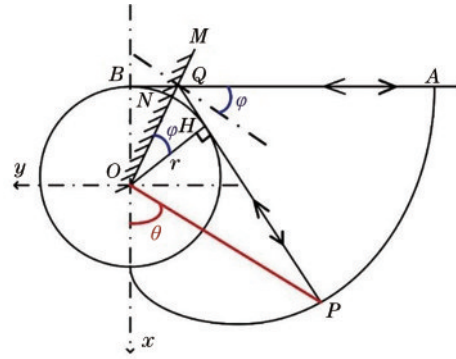


图 1 渐开线反射镜光学延迟线原理图

Fig. 1 Diagram of optical delay line of involute mirror

根据渐开线性质,可得 HP 的距离公式为

$$d_{HP} = r(\pi - 2\varphi), \quad (2)$$

式中, r 为基圆半径。由三角形边角关系得

$$d_{QB} = d_{QH} = \frac{r}{\tan \varphi}, \quad (3)$$

此时的光程 L 为

$$L = d_{AB} + d_{HP}. \quad (4)$$

所以光在装置中传播的距离只与 d_{HP} 有关。当旋转反射镜旋转一定角度,反射光入射在渐开线上的 P' 点并与基圆相切于 H' 点,假设旋转的角度为 $\Delta\varphi$, 此时旋转反射镜旋转的角度为 φ' , 此时的光程为

$$L' = d_{AB} + d'_{HP}, \quad (5)$$

式中,

$$d'_{HP} = r(\pi - 2\varphi') = r(\pi - 2\varphi - 2\Delta\varphi). \quad (6)$$

因为光入射到渐开线反射面后沿原路径反射,所以总光程为光路长度的 2 倍,所以旋转反射镜旋转 $\Delta\varphi$ 后的总光程差 ΔL 为

$$\begin{aligned} \Delta L &= 2(d_{HP} - d'_{HP}) = \\ &= 2r(\pi - 2\varphi - \pi + 2\varphi + 2\Delta\varphi) = 4r\Delta\varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

所以在渐开线反射面光学延迟线装置中,延迟时间只取决于渐开线基圆半径 r 和反射镜的旋转角度 $\Delta\varphi$ 。在理想情况下,基圆半径 r 越大延迟时间越长,但实际情况下光学延迟线大小会受到精度和稳定性限制,因此需要合理控制基圆大小。实际情况下,反射镜的长度和数量决定了反射镜的旋转角度,因为反射镜要通过旋转从而使得旋转角度发生转变,为了保证转轴的稳定,反射镜应该在转轴上呈均匀分布。理论上旋转反射镜长度越长对应的旋转角度越大,但是在提升旋转反射镜长度的同时,会发生上一面反射镜遮挡下一面反射镜的反射光路的情况。在理想状态下反射镜长度和反射镜个数满足:

$$R = \frac{r}{\sin(\pi/n)}, \quad (8)$$

式中: R 为基圆圆心到旋转反射镜顶点的距离; n 为旋转反射镜的个数。由此可以得出在基圆半径确定的情

况下反射镜个数和反射镜长度成反比例关系。

图 2 为不同基圆半径时, $\Delta\varphi$ 和 ΔL 的变化关系图。

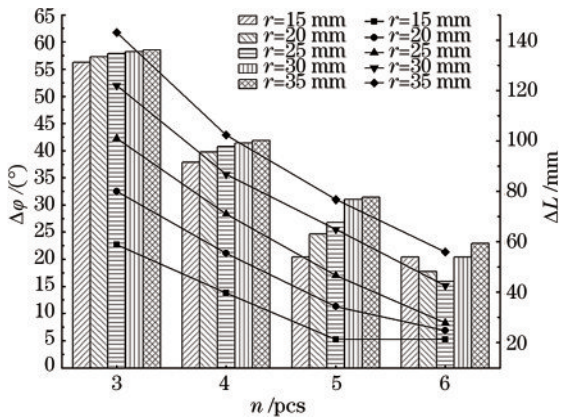


图 2 渐开线参数对延迟时间和旋转角度的影响

Fig. 2 Effect of involute parameters on delay time and rotation angle

当反射镜个数为 4 时, 基圆半径分别为 20、25、30、35 mm 时, 延迟距离均符合要求, 为了获得更大的延迟距离, 以及较小的装置体积, 最终选择基圆半径为 25 mm、反射镜长度为 8 mm (即 $R=33$ mm)、反射镜个数为 4 的情况。由此计算得到延迟距离 $\Delta L=71$ mm。由此参数计算出光学延迟时间为

$$t = \frac{\Delta L}{c} = 236 \text{ (ps)}, \quad (9)$$

式中, c 为光速。

2.2 光学延迟线的机械结构

渐开线反射面光学延迟线 (图 3) 装置主要工作主体为旋转平面反射镜, 渐开线反射面作为固定曲面充当次要工作主体。旋转反射镜组如图 3(d) 所示, 直角边较长的一面与基准面胶合, 高出基准面的部分镀膜, 作为平面反射镜镜面, 较短的一面与固定面胶合。

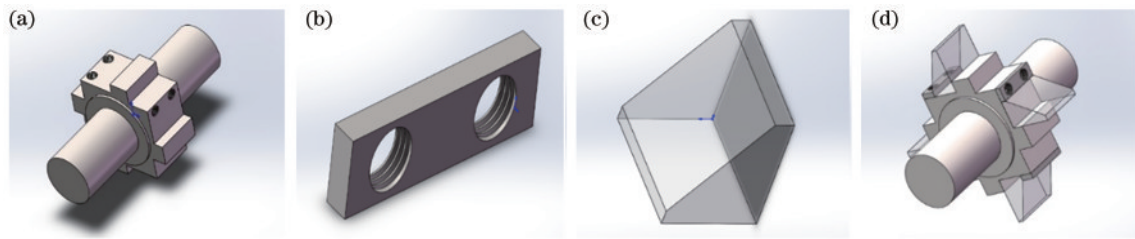


图 3 旋转反射镜各部分模型。(a) 转轴; (b) 旋转反射镜固定压板; (c) 旋转反射镜; (d) 旋转反射镜组

Fig. 3 Model diagram of rotating mirror parts. (a) Rotating axis; (b) fixing plate of rotating mirror; (c) rotating mirror; (d) rotating mirror array

考虑到平面镜与转轴采用的是胶合的方式, 且在轴的方向的位移对于光束传播路径在理论上无影响, 在轴的方向上没有加入限制定位结构, 仅在竖直和水平方向进行定位, 其中垂直通过轴心的面为平面反射

镜角度基准定位面, 保证反射面垂直通过轴心, 为了保证足够的反射面大小, 减小基准面的大小, 同时为了保证反射镜安装紧固, 在后端用螺钉固定一个小块固定反射镜, 各部分结构如图 4(a)~4(d) 所示。

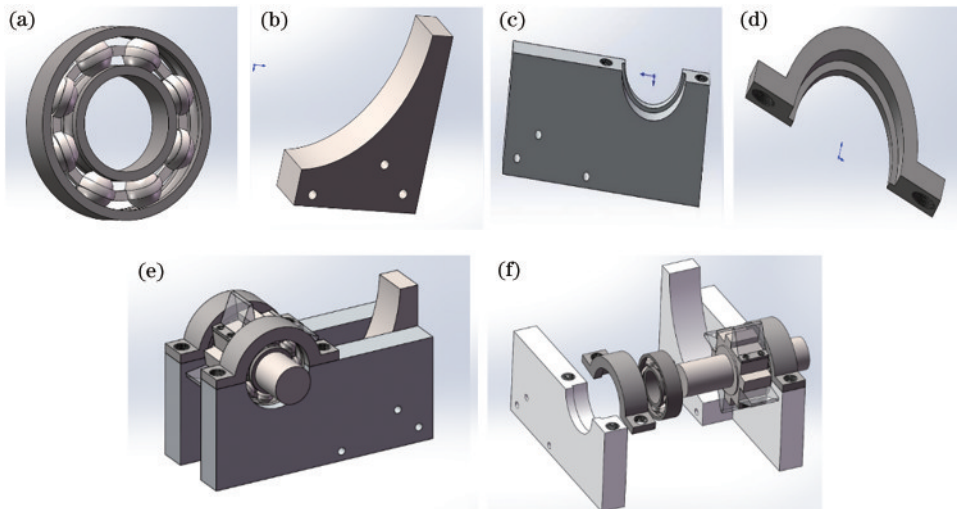


图 4 光学延迟线装置。(a) 轴承; (b) 渐开线反射面; (c) 装置固定结构; (d) 轴承固定压圈; (e) 光学延迟线装置图; (f) 光学延迟线爆炸示意图

Fig. 4 Optical delay line device. (a) Bearing; (b) involute reflector; (c) fixing structure; (d) bearing fixation ring; (e) optical delay line model diagram; (f) optical delay line exploded diagram

图 4(e)~4(f)则为渐开线反射面光学延迟线装置的整体构造图。设计时通过装置固定结构和轴承限制渐开线反射面与转轴的水平距离,使其可以满足设计要求。为了防止旋转反射镜在 z 轴和 x 轴方向上的运动,设计了轴承固定压圈来限制轴承的运动,从而限制旋转轴的运动。同时在装置固定结构上采用三点定位的方式固定渐开线曲面,保证其角度,并保证在装置工作时切平面与旋转反射镜反射面平行。此时整个光学延迟线装置设计完成,并可以满足设计要求。

2.3 光学延迟线的软件仿真与光线追迹

基于 LightTools 软件,导入该光学延迟线的模型,改变反射镜反射面旋转的角度进行光路追迹,比较在不同旋转角度下的光路和在接收面上的光斑,验证光学延迟线装置是否符合设计要求。对以下反射镜工作旋转角度 $\Delta\varphi = 0^\circ$ 、 $\Delta\varphi = 10^\circ$ 、 $\Delta\varphi = 25^\circ$ 和 $\Delta\varphi = 35^\circ$ 分别进行光线追迹,追迹图如图 5 所示,追迹结果所得像面光斑变化数据见表 1。光线中心沿基圆切线入射

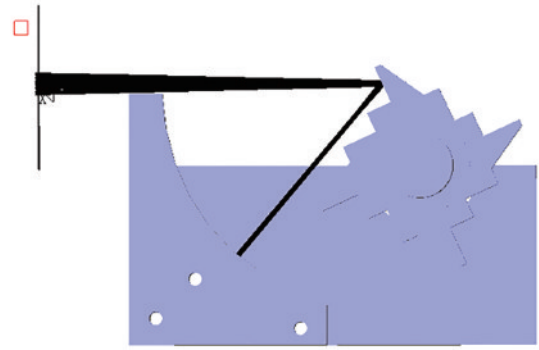


图 5 光学延迟线光线追迹图

Fig. 5 Ray tracing diagram of optical delay line

时,光线的中心线将按照设计光路进行传播,但在经渐开线反射面反射后(即 $\Delta\varphi \neq 0^\circ$ 时),可以观察到光束在传播时的发散现象(图 6),光斑直径最大为 2.8 mm。仿真中,光源为直径为 1 mm 的圆形光源,发散角为 0.5° ,探测器为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方形平面。

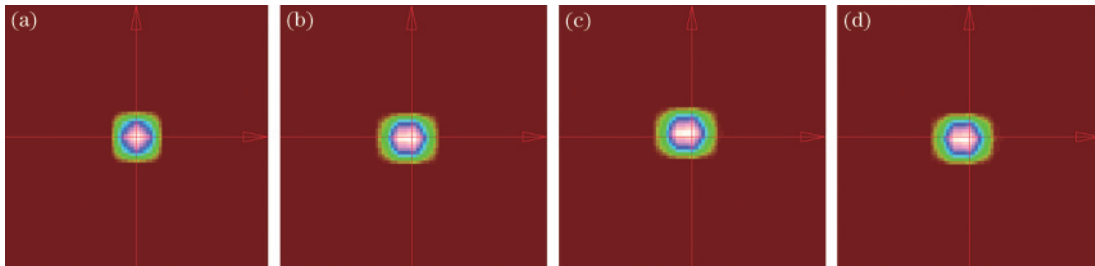


图 6 不同工作角度 $\Delta\varphi$ 光学延迟线的光线追迹。(a) 0° ; (b) 10° ; (c) 25° ; (d) 35°

Fig. 6 Ray tracing of optical delay line at different $\Delta\varphi$. (a) 0° ; (b) 10° ; (c) 25° ; (d) 35°

表 1 不同工作角度 $\Delta\varphi$ 的出射光斑变化

Table 1 Variation of output beam spot at different $\Delta\varphi$

Different working angle $\Delta\varphi / (^\circ)$	Center position of spot $(x, y) / (\text{mm}, \text{mm})$	Spot diameter / mm
0	0.00, 0.00	2.0
10	-0.10, -0.05	2.5
25	-0.10, 0.10	2.7
35	-0.10, 0.05	2.8

3 分析与讨论

3.1 渐开线反射面光学延迟线的误差分析

偏心误差在旋转装置中是常见的误差,是在加工或装配时,工件找正、装夹、车削过程中,两圆的中心距产生距离上的位置偏差所产生的误差。该渐开线反射面旋转光学延迟线装置的偏心误差主要产生在旋转反射镜的转轴上,针对该装置的偏心误差进行数学建模,分为两个理想化模型,即 x 轴偏心和 y 轴偏心如图 7 所示。

y 轴偏心误差是指转轴中心相对于渐开线基圆圆心在 y 轴方向的误差。假设入射光束为理想光束,传

播过程中不发生扩散,且忽略光斑半径,仅考虑中心主光线。入射光沿着 AB 方向入射,在偏心后的平面反射镜上发生镜面反射,反射光按照 $Q'P'$ 方向入射到渐开线反射面上,此时光不再按照渐开线法线方向入射,所以不再按照原路径返回,而会按 $P'Q''$ 方向反射到平面镜上,再经过平面镜的反射按照 $Q''A'$ 的路径出射,此时入射光和出射光的夹角为 $\Delta\theta$, $\Delta\theta$ 即为入射光和出射光的角度偏差。当旋转反射镜的轴心与渐开线基圆圆心在 y 轴上偏移 Δy 时, P' 点相对于 P 点沿渐开线向 y 轴负半轴方向移动。因为 HP 与 $H'P'$ 平行,所以当 Δy 增大时, P' 点相对于 P 点沿渐开线向 y 轴的偏移更大。

x 轴偏心误差是指转轴轴心相对于基圆圆心在 x 轴上的偏差。与 y 轴偏心误差不同的是, x 轴偏心误差会改变旋转反射镜的旋转角度,如图 8 所示,将装置简化为只有反射镜的情况,图中的 L 为无 x 轴偏心误差时平面镜的极限位置, L'' 为存在 x 轴偏心误差时,其相对于 x 轴的平面镜位置, L''' 为存在 x 轴偏心误差时的平面镜的极限工作旋转位置。平面镜 L'' 和平面镜 L''' 的夹角为 $\Delta\varphi'$ 。

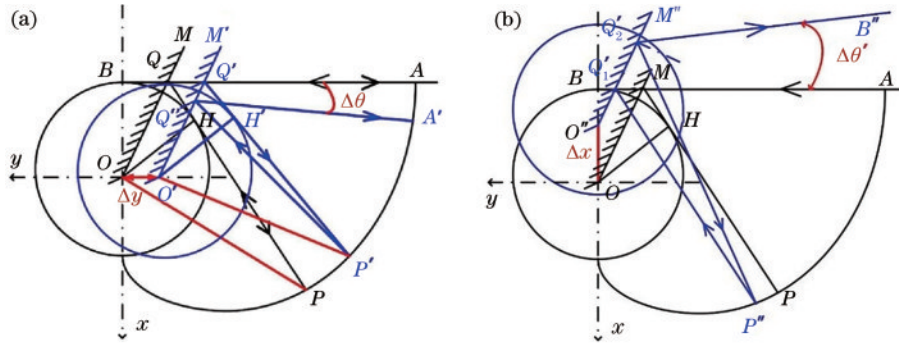


图 7 偏心误差示意图。(a) y轴偏心误差；(b) x轴偏心误差

Fig. 7 Schematic diagram of eccentricity error. (a) y-axis eccentricity error; (b) x-axis eccentricity error

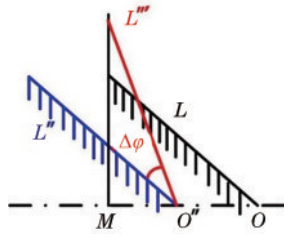


图 8 存在 x 轴偏心误差时的平面镜极限位置图

Fig. 8 Plane mirror limit position with x-axis eccentricity error

当出现 x 轴偏心的平面反射镜旋转到理论情况的极限旋转角度时,由于偏心误差使得平面反射镜的顶端与理论情况在 x 轴上会出现 Δx 的误差,从而使得旋转角度产生的 $\Delta\phi'$ 的变化。根据三角形的几何关系可得

$$\Delta\phi' = \arccos\left(\frac{r - \Delta x}{R}\right) - \arccos\left(\frac{r}{R}\right), \quad (10)$$

式中: r 为基圆半径; R 为平面反射镜长度; Δx 为旋转

反射镜轴心相对于渐开线反射面基圆圆心的 x 轴偏差, Δx 的符号由偏心沿 x 轴的方向决定, x 轴正方向为正, x 轴负方向为负 (Δx 带入公式时没有正负, $\Delta\phi'$ 的计算结果仅表示和理论情况的偏差值, 符号和 Δx 一致, “+”表示相对于理论旋转角度减小, “-”表示相对于理论旋转角度增大)。根据式(10)得, 当 Δx 增大时 ($r - \Delta x$)/ R 减小, 则 $\arccos[(r - \Delta x)/R]$ 增大, 又因为 $\arccos(r/R)$ 是一个固定值, 所以 $\Delta\phi'$ 增大。即当 Δx 为 “+” 且增大时, 旋转反射镜的旋转角度减小; 当 Δx 为 “-” 且增大时, 旋转反射镜的旋转角度增大。图 9 为 1 mm 的 x 轴和 y 轴偏心误差状态下进行仿真所得到的出射光照度图, 偏心误差仿真使用和 2.3 节光路仿真相同的设置, 在偏心误差下, y 轴的出射光光斑由直径 2 mm 的圆形光斑向探测器下方发散至 6 mm, 呈圆锥形; x 轴的出射光光斑向上发散至最大为 4 mm。出射光均出现了明显的形变和发散, 由此可见, 在光学延迟线装配过程中需要较高的装配精度。

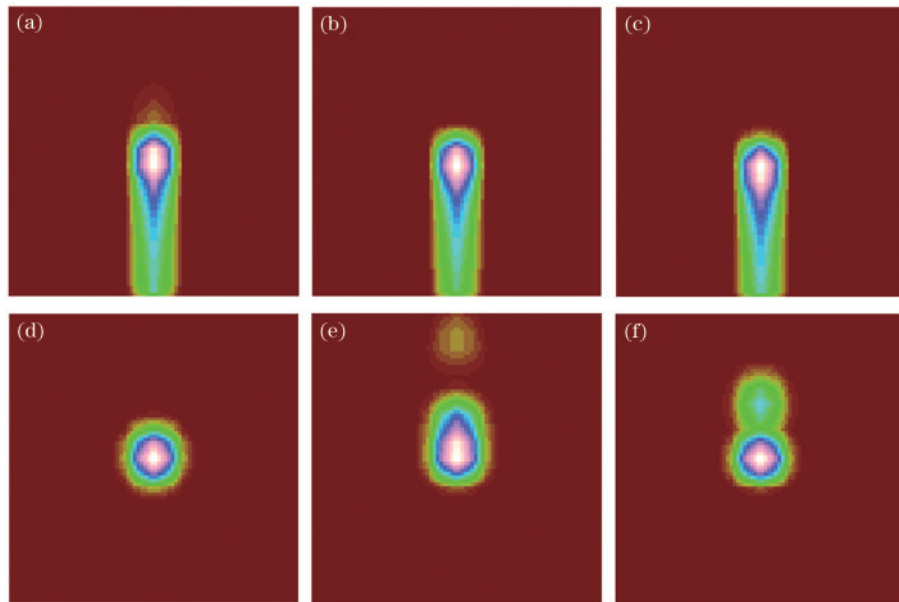


图 9 1 mm 偏心误差时的光斑照度图。(a) y 轴 10°; (b) y 轴 25°; (c) y 轴 35°; (d) x 轴 10°; (e) x 轴 25°; (f) x 轴 35°

Fig. 9 Spot illuminance diagram of 1 mm eccentricity error. (a) y-axis 10°; (b) y-axis 25°; (c) y-axis 35°; (d) x-axis 10°; (e) x-axis 25°; (f) x-axis 35°

3.2 平面镜角度误差和入射光发散角误差

在加工或装配平面反射镜时,有可能出现平面的角度误差 $\Delta\beta$,如图 10 所示。此时入射光在装置中沿光路 2 传播,因为平面镜的角度误差 $\Delta\beta$ 不会特别大,所以在计算中可以忽略因为角度误差导致的平面镜厚度对于光程的影响。通过比较某固定角度时出现角度差和理想情况下的光程来分析平面镜角度误差。

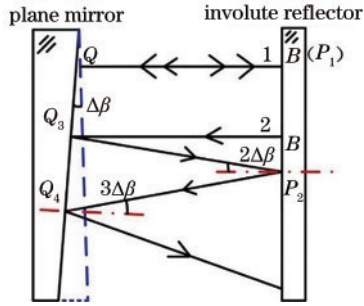


图 10 平面镜反射角度误差示意图

Fig. 10 Schematic diagram of plane mirror reflection angle error

当平面镜无角度误差时,光线按路径 1 传播,此时光在装置中的光程为

$$L = 2(d_{BQ} + d_{QP_1}). \quad (11)$$

当平面反射镜出现左右角度偏差时,光线沿路径 2 传播,光在装置中的光程为

$$L' = d_{BQ_3} + d_{Q_3P_2} + d_{P_2Q_4} + d_{Q_4B_1}. \quad (12)$$

因为忽略 $\Delta\beta$ 对于平面反射镜的厚度影响,则 $d_{BQ_3} = d_{BQ}$,有

$$d_{P_2Q_4} = d_{Q_3P_2} = d_{QP_1} / \cos(2\Delta\beta), \quad (13)$$

$$d_{Q_4B_1} = d_{BQ} / \cos(4\Delta\beta). \quad (14)$$

故平面反射镜存在左右角度偏差时的光程为

$$L' = d_{BQ} \times \left[1 + \frac{1}{\cos(4\Delta\beta)} \right] + d_{QP_1} \times \left[\frac{2}{\cos(2\Delta\beta)} \right]. \quad (15)$$

此时理想状态和偏差情况的光程差为

$$\Delta l = L' - L = d_{BQ} \times \left[\frac{1}{\cos(4\Delta\beta)} - 1 \right] + d_{QP_1} \times \left[\frac{2}{\cos(2\Delta\beta)} - 1 \right]. \quad (16)$$

所以存在左右角度偏差时,光学延迟线装置的光学延迟距离为

$$\Delta L'' = 4r\Delta\varphi \left[\frac{1}{\cos(2\Delta\beta)} - 1 \right]. \quad (17)$$

根据式(17)可知,平面反射镜反射面左右偏差越大,光学延迟线装置的光学延迟距离越大,可以根据式(17)对光学延迟线装置进行修正。

在实际情况下,激光是一种具有良好准直性的光源,但是依然会存在一定的发散角,所以在装置中的传播过程中不会严格按照理想光路径传播,同时激光光束依然具有一定的宽度,即入射光不是理想点光束,从而导致出射光具有一定程度的发散或畸变。

图 11 为激光发散角对光传播路径的影响,假设激光从 B 点入射时的发散角为 α ,且激光中心沿着渐开线基圆入射。图中由 B 点发出的虚线表示理想光束的传播路径,由 B 点发出的实线表示存在发散角 α 时的传播路径。

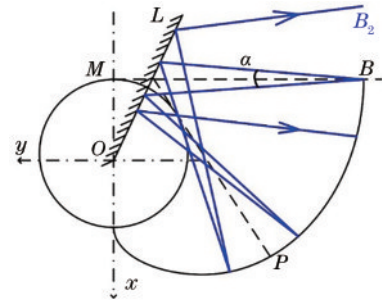


图 11 激光发散角的影响

Fig. 11 Effect of laser divergence

由图 11 可明显得出,随着激光发散角的增大,出射光束的发散角就越大,而发散角越大则会导致出射光斑的畸变增大。在 LightTools 中改变光源的参数设置,对准直光束、 0.5° 和 1° 等不同发散角的光源进行了光学延迟线出射光光路仿真。不同发散角的仿真结果如图 12 所示。

根据图 12 中的光线追迹结果,当增大发散角时出射光斑的发散程度也随之增大,而当发散角增大到超过临界值,入射光将在延迟线装置中发生多次反射,产生大量的杂散光,导致出射光的整体功率的下降,从而影响后续 THz 信号的探测质量,虽然出射光的畸变程

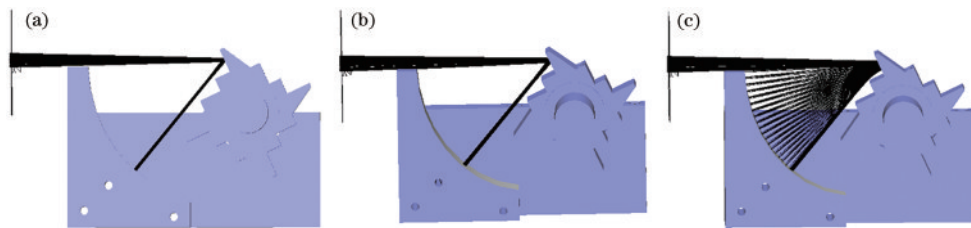


图 12 不同入射光发散角 α 对应的光线追迹。(a) 0° ; (b) 0.5° ; (c) 1°

Fig. 12 Ray tracing corresponding to different incident light divergence angles. (a) 0° ; (b) 0.5° ; (c) 1°

度变化并不明显,但是在实际应用中,也应该避免这种情况的出现。激光入射时应该尽量选择发散角较小的激光光源,这样才能更好地保证光在装置中的传播路径,减少遮光量,提升出射光强度,同时也有利于减小畸变。因此使用渐开线延迟线方法,能在比较宽松的安装精度情况下,提供优于线性位移平台光学延迟线的延迟时间和扫描频率。

4 结 论

针对基于渐开线反射面的旋转光学延迟线装置,计算分析并选取合适的参数对该光学延迟线装置进行了三维建模,并在 LightTools 中进行了光学软件仿真。在已建立的数学模型基础上对可能影响旋转光学延迟线性性能的各种误差情况进行了分析,包括旋转反射镜轴心的偏心误差和平面镜的角度误差对于光学延迟线光路的影响,对以上误差进行了仿真,并分析了消除误差的方法。该仿真设计为 THz-TDS 系统的快速扫描提供了很好的指导意义,有利于 THz-TDS 技术的普及和推广。

参 考 文 献

- [1] 周智伟. 太赫兹技术发展综述(上)[J]. 军民两用技术与产品, 2020(1): 40-44.
Zhou Z W. Overview of terahertz technology development (Part 1)[J]. Dual Use Technologies & Products, 2020(1): 40-44.
- [2] 武帅, 屈浩, 涂昊, 等. 太赫兹技术应用进展[J]. 电子技术应用, 2019, 45(7): 3-7, 18.
Wu S, Qu H, Tu H, et al. Progresses towards the application of terahertz technologies[J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(7): 3-7, 18.
- [3] FergusonBradley, 张希成. 太赫兹科学与技术研究回顾[J]. 物理, 2003, 32(5): 286-293.
Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Physics, 2003, 32(5): 286-293.
- [4] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
Liu S G. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12.
- [5] 杨振京. 快速 THz-TDS 信号检测系统优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2017.
Yang Z J. Optimization design of fast THz-TDS signal detection system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [6] Neu J, Schmittenmaer C A. Tutorial: an introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(23): 231101.
- [7] 曹丙花, 郑德栋, 范孟豹, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的多层涂层高效可靠测厚方法[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0112001.
Cao B H, Zheng D D, Fan M B, et al. Efficient and reliable thickness measurement method for multilayer coatings based on terahertz time-domain spectroscopy technology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0112001.
- [8] Khurgin J. Adiabatically tunable optical delay lines and their performance limitations[J]. Optics Letters, 2005, 30(20): 2778-2780.
- [9] Xu J Z, Zhang X C. Circular involute stage[J]. Optics Letters, 2004, 29(17): 2082-2084.
- [10] Wang Y B, Wang C L, Xing Q R, et al. Periodic optical delay line based on a tilted parabolic generatrix helicoid reflective mirror[J]. Applied Optics, 2009, 48(11): 1998-2005.
- [11] 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.
Huang Z H, Liu Y, He M X, et al. Fast optical delay line device based on involute principle[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(12): 3289-3294.
- [12] 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.
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.
- [13] Xu J, Lu Z, Zhang X C. Compact involute optical delay line[J]. Electronics Letters, 2004, 40(19): 1218-1219.
- [14] 菲亚洲, 邱亮. 基于磁杆直线电机的光学延迟线研究[J]. 光学仪器, 2020, 42(1): 82-87.
Mao Y Z, Qiu L. Research on optical delay line based on magnetic rod linear motors[J]. Optical Instruments, 2020, 42(1): 82-87.
- [15] 辛胤杰, 李全勇, 程爽, 等. 太赫兹时域光谱系统快速旋转光学延迟线设计[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0614001.
Xin Y J, Li Q Y, Cheng S, et al. Design of fast rotating optical delay line for terahertz time-domain spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0614001.
- [16] 黎小妹, 王可嘉, 项飞荻, 等. 光纤耦合式太赫兹时域频谱系统中空间耦合效率的实验研究[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(3): 46-50, 95.
Li X S, Wang K J, Xiang F D, et al. Experimental study of spatial coupling efficiency in optical fiber terahertz time domain spectrum system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(3): 46-50, 95.
- [17] 葛本安, 袁英豪. 一种用于光纤耦合式太赫兹时域光谱系统的高稳定光学延迟线设计[J]. 光学技术, 2021, 47(3): 277-281.
Ge B A, Yuan Y H. A high-stability optical delay line design for Fiber-coupled Terahertz time-domain spectroscopy system[J]. Optical Technique, 2021, 47(3): 277-281.