

快速旋转光学延迟线的非线性误差校准技术

祝莉莉^{1,2,3}, 薛竣文³, 任姣姣^{1,2,3}, 张丹丹^{1,2,3}, 顾健^{1,2,3}, 张霁旸³, 李丽娟^{1,2,3*}¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²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;³长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528403

摘要 光学延迟线是影响太赫兹时域光谱系统中太赫兹信号准确性、信噪比以及频谱分辨率的关键环节。本文设计了一种由 24 个转盘反射面 (TRS) 构成的快速旋转光学延迟线 (FRODL)。通过对 FRODL 工作角度的仿真, 得到了其理论延迟时间和理论非线性度。基于 FRODL 实际耦合过程中耦合功率的波动性大小, 确定了 FRODL 的实际工作区间, 并搭建了偏振迈克耳孙干涉系统, 对 FRODL 结构的实际延迟时间进行标定, 得到了各转盘反射面工作的实际延迟时间。标定结果显示, FRODL 校准前的最大非线性误差为 0.094 ps, 非线性度为 0.215%。通过两次利用三次样条插值, 对 FRODL 实际延迟时间和采样点信号进行匹配, 获得了校准后的太赫兹等间隔时域波形。

关键词 光学延迟线; 非线性校准; 太赫兹时域光谱系统; 延迟时间; 非线性误差

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231657

1 引言

光学延迟线 (ODL) 通过改变飞秒脉冲和太赫兹 (THz) 脉冲的相对延迟时间, 实现对 THz 时域信号的扫描探测, 是影响太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统中 THz 采集信号准确性、信噪比以及频谱分辨率的关键环节^[1-4]。目前 THz-TDS 系统中使用的 ODL 根据工作原理通常可分为线性光学延迟线 (LODL) 和旋转光学延迟线 (RODL), 其中, LODL 具有线性度好、出射光束质量好、平稳度较好的优点, 由于步进电机的机械惯性, LODL 无法实现快速高频率扫描^[5-7]。为满足 THz-TDS 系统高速检测的发展需求, 各种不同工作原理的 RODL 被提出, 由于 RODL 受表面形状的限制, 延迟时间的线性度较差^[8-12]。在 THz-TDS 系统中, ODL 延迟时间的非线性程度直接影响 THz-TDS 系统采样信号的准确性和一致性, 延迟时间的非线性变化, 使得系统的实际采样间隔存在非线性, 导致飞秒激光的脉冲光程产生非线性变化, 进而引起 THz 光谱谱线位置的误差。THz 采样信号的非线性误差越大, 采集到的 THz 信号失真情况越严重, 后续数据处理的难度越大, 因此, 急需解决各类 RODL 延迟时间的非线性问题^[13-14]。

目前对于 THz-TDS 系统的信号误差校准, 多集中于后期数据处理阶段, 进行 THz 信号的峰值进行信

号对齐, 或利用快速傅里叶变换算法将时域信号转换为频域信号, 通过对比水蒸气的频谱特征峰位置, 对采集到的 THz 信号数据, 进行波形重构校准误差^[15]。这种校准方法需要 ODL 产生的延迟时间间隔是相等的, 但对于 RODL 其加工和安装精度误差以及偏转角的定位误差会导致 THz 信号产生更复杂的失真。因此除信号后期算法修正外, 还需要对 ODL 实际延迟时间的非线性误差进行校准。2017 年 Molter 等^[16]搭建了与 THz-TDS 系统同光路的马赫-曾德尔干涉仪, 利用马赫-曾德尔干涉仪的干涉信息, 获取 LODL 工作过程中 THz 波形幅值与 LODL 采样点的关系, 构建误差查找表, 以改善 THz 时域数据的光谱质量。但该干涉仪与 THz-TDS 系统光路使用同一分光棱镜, 这不仅要求 THz-TDS 系统必须为空间光路, 干涉仪系统与 THz-TDS 系统波长相近, 并且增加了光路结构的复杂程度, 使得光路调节难度大幅度增加。2019 年 Mamrashev 等^[17]针对 LODL 的定位误差, 通过使用高精度光学编码器提高了 LODL 工作过程中位移台的位置测量精度, 建立了 LODL 每个采样位置处的 THz 电场与光学编码器提供的位移台测量位置的关系, 对 LODL 工作的延迟时间间隔进行了校准。但该方法只讨论了 LODL 的定位精度, 没有提出适用于 RODL 的校准方法。因此, 本文设计了一种由多个转盘反射面

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-07; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2023-12-23

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20220508032RC)、中山市第九批创新科研团队 (GXTD2022010)、中山市第二批社会公益和基础研究项目 (2022B2012)

通信作者: *custjuan@126.com

(TRS)构成的快速旋转光学延迟线(FRODL),并搭建了偏振迈克耳孙干涉系统,基于FRODL结构总延迟时间和延迟时间间隔的实际标定结果,实现了对FRODL实际延迟时间的非线性误差校准。

2 理论模型

2.1 结构及工作原理

如图 1(a)所示,本文设计了一种由 24 个 TRS 构成的 FRODL,该 FRODL 由转盘、耦合透镜、聚焦透镜和平面反射镜组成。其中,图 1(b)中转盘为 FRODL 的旋转主体,且每个 TRS 编号逆时针排列。聚焦透镜和平面反射镜可以使光束二次经过 TRS,这样不仅增

大了 FRODL 系统 TRS 的延迟时间,同时使反射回耦合器的空间光更方便地耦合进光纤。FRODL 的具体工作原理为:飞秒激光经光纤传输由耦合透镜出射至自由空间,入射到转盘的某一 TRS 上并由 TRS 反射,经聚焦透镜后入射到平面反射镜上,最终由平面反射镜反射,经聚焦透镜、TRS 和耦合透镜后原路返回到入射光纤。

本文 FRODL 的转盘基圆半径 $R=85\text{ mm}$, TRS 与转盘基圆的切线夹角 $\alpha=30^\circ$, TRS 相对于转盘基圆圆心的张角 $\theta=15^\circ$ 。聚焦透镜焦距 $f=30\text{ mm}$, 直径 $D=25.4\text{ mm}$, 耦合透镜焦距 $f_0=4.6\text{ mm}$, 透镜直径 $D_0=3.6\text{ mm}$ 。

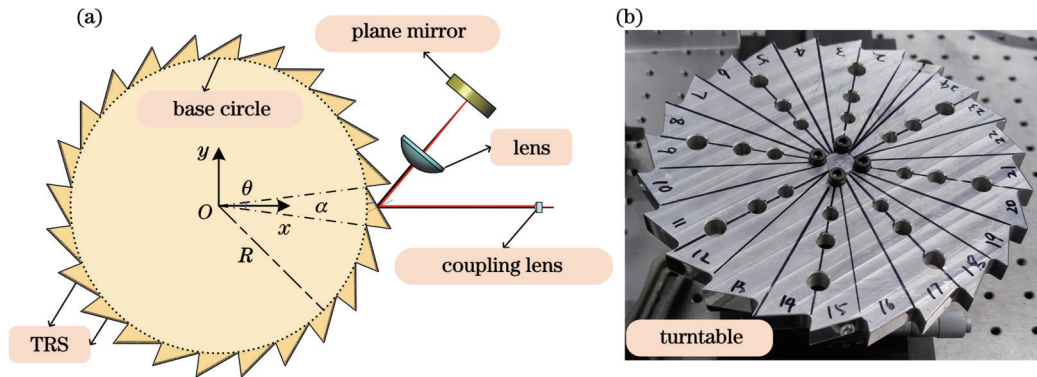


图 1 FRODL 原理图。(a)FRODL 二维简化模型;(b)转盘实物图

Fig. 1 FRODL schematic diagram. (a) FRODL two-dimensional simplified model; (b) physical diagram of turntable

2.2 工作角度仿真

为进一步验证 FRODL 光路的可行性,对 FRODL 在不同旋转角度下的光路结构进行仿真,将飞秒激光

径向入射到转盘 TRS1 时的初始位置记为 FRODL 的 0° 位置,旋转间隔为 0.1° 。转盘不同旋转角度下光路结构的典型仿真结果如图 2 所示。

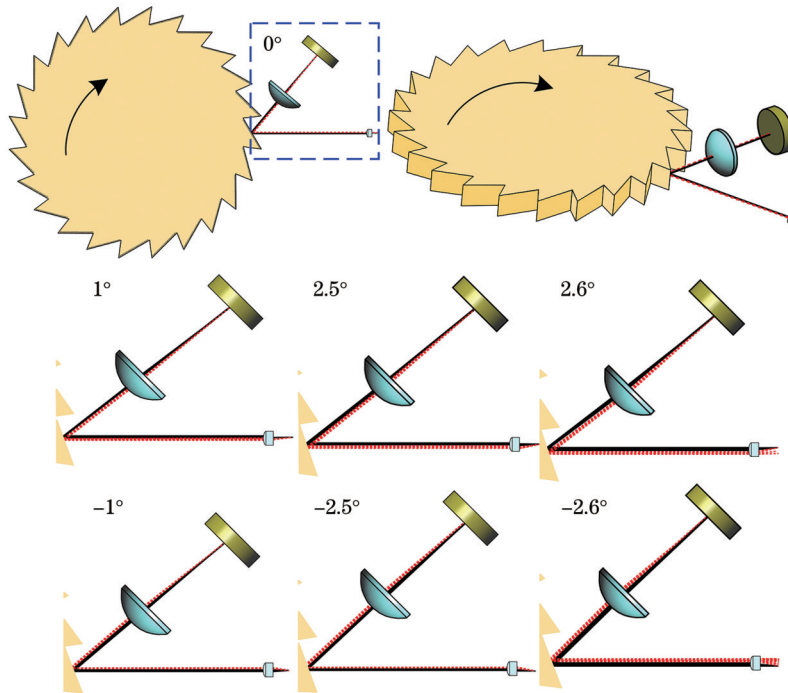


图 2 FRODL 不同旋转角度下的光路仿真结果

Fig. 2 Simulation results of optical path under different rotation angles of FRODL

图 2 中实线为入射光束, 点线表示反射光束, FRODL 转盘在 -2.5° 到 2.5° 之间旋转时, 反射光线均可返回到耦合透镜中并由耦合透镜聚焦。随着旋转角度继续增大到超过 2.5° 时, 反射光线的纵向位移超过了耦合透镜的入瞳直径, 反射光束无法由耦合透镜全部聚焦到光纤中, 因此 FRODL 的理论工作区间为 $[-2.5^\circ, 2.5^\circ]$ 。当 FRODL 工作区间处于近轴区时, 其延迟时间与工作角度的关系可表示为

$$t(\gamma) = \frac{4}{c} \left[\frac{M \cos \alpha \sin \alpha \cdot \gamma}{1 + \tan \alpha \cdot \gamma} \right], \quad (1)$$

式中: $M = R \left(1 + \tan \frac{\theta}{2} \tan \alpha \right)$; c 为真空中的光速; α 为 TRS 与转盘基圆的切线夹角; γ 为转盘相对于初始位

置的旋转角度。

FRODL 的延迟时间由转盘旋转过程中光程的变化产生, 图 3(a) 中方形标记结果为 FRODL 理论延迟时间, 圆形标记结果为 FRODL 经最小二乘法拟合得到的理想延迟时间曲线。在 $[-2.5^\circ, 2.5^\circ]$ 的工作区间下, FRODL 的理论延迟时间可达到为 43.522 ps , 拟合后的理想延迟时间为 43.465 ps , 理想延迟时间对旋转角度的灵敏度为 $8.693 \text{ ps}/(^{\circ})$ 。FRODL 理论延迟时间的非线性误差如图 3(b) 所示, FRODL 在不同旋转角度下延迟时间的非线性误差呈现出类二次曲线形状。当转盘旋转角度为 2.5° 时, FRODL 非线性误差最大, 可达到 0.132 ps 。此时 FRODL 的理论非线性度为 0.304% , 即线性度可达 99.696% 。

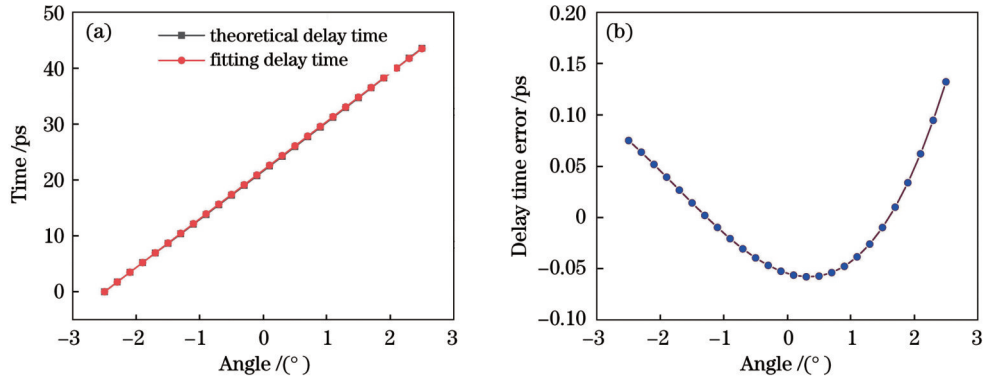


图 3 FRODL 延迟时间理论结果。(a) 延迟时间; (b) 非线性误差曲线
Fig. 3 Theoretical results of FRODL delay time. (a) Delay time; (b) nonlinear error curve

3 实验及结果分析

3.1 实际工作区间

在 FRODL 的实际应用中, 常采用光纤耦合式结构, 结合环形器实现 FRODL 中飞秒激光由光纤-空间光-光纤的自耦合。由 2.2 节的仿真结果可知, 当转盘旋转角度超出工作区间时, 返回的飞秒激光将超出透镜的入瞳直径, 无法全部被耦合进光纤中, 导致入射到

光电导发射天线上的光功率较小, 产生的 THz 信号信噪比较差。为保证激发 THz 信号的信噪比较高, 需要 FRODL 实际工作中整体功率的波动范围不超过 10% ^[18-20]。

FRODL 耦合功率测试系统的工作原理如图 4(a) 所示, 其中飞秒激光的传播路径为: FL-port 1-port 2-CL-TRS-lens-PM-lens-TRS-CL-port 2-port 3-OPM。飞秒激光器出射的飞秒激光光功率恒定, 通过记录

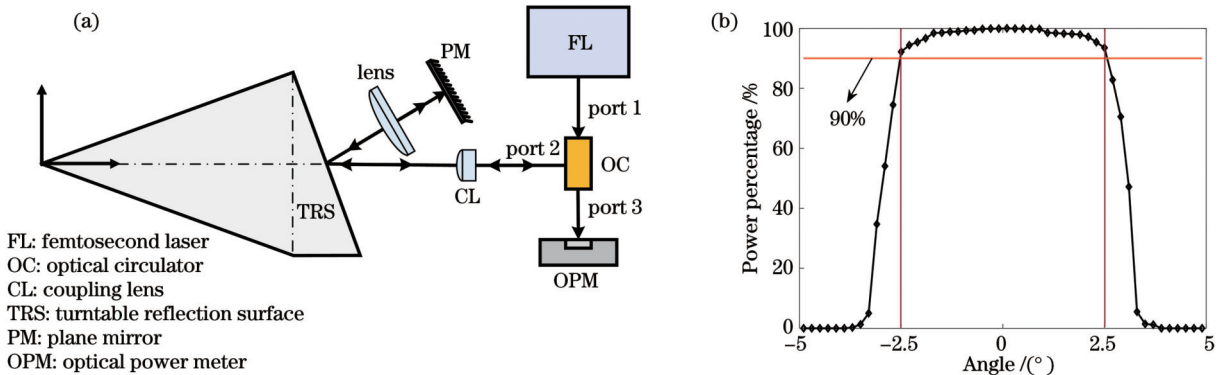


图 4 FRODL 实际工作区间标定。(a) FRODL 耦合功率测试系统; (b) FRODL 在不同旋转角度下的耦合光功率相对于正入射耦合光功率的占比
Fig. 4 Calibration of actual working range of FRODL. (a) FRODL coupling power testing system; (b) proportion of coupling optical power of FRODL relative to normal incident coupling optical power at different rotation angles

FRODL 在不同旋转角度下 port 3 端对应的光功率大小,可表征出 FRODL 的实际角度工作区间。图 4(b) 为 FRODL 在不同旋转角度下,耦合光功率相对正入射耦合光功率的占比。由图可知,FRODL 在正入射角度附近耦合光功率最大且较为稳定,在 $[-2.5^\circ, 2.5^\circ]$ 的旋转角度内,耦合光功率大于正入射耦合光功率的 90%,由此可确定 FRODL 的实际角度工作区间为 5° 。

3.2 延迟时间标定

如图 5 所示,本文搭建了偏振迈克耳孙干涉测量系统,对 FRODL 实际旋转角度产生的延迟时间进行

标定,其中参考臂为反射镜,测量臂为 FRODL。与普通迈克耳孙干涉系统相比,光路中增加了 1/4 波片、起偏器和检偏器,用于消除杂散光对干涉条纹的影响,同时通过调节偏振元件的光轴方向,控制参考臂光路和测量臂的光功率近似相等,使得 CCD 中得到更稳定、对比度更高的干涉条纹。利用 FRODL 旋转时测量臂光程相对于参考臂光程的变化,通过标记测量干涉图像中指定位置的灰度值变化,对转盘转动时干涉条纹的变化个数进行计数,进而获得 TRS 的实际延迟距离与延迟时间。

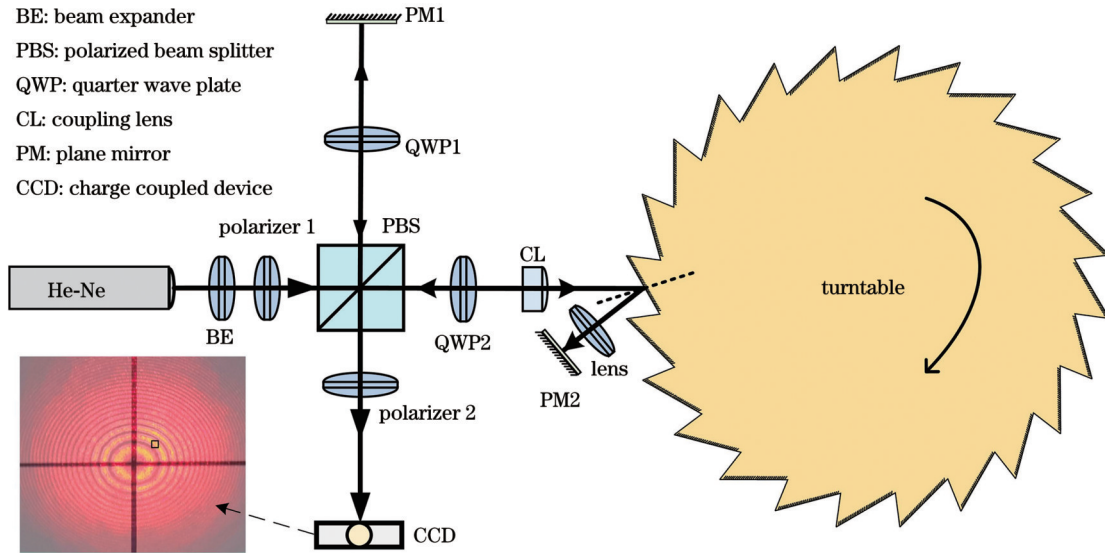


图 5 偏振迈克耳孙干涉系统装置原理图

Fig. 5 Diagram of polarization Michelson interference system device

利用偏振迈克耳孙干涉系统,对 FRODL 转盘每个 TRS 的实际延迟时间进行多次标定,转盘每个 TRS 产生的平均实际延迟时间如图 6(a) 所示。TRS 的平均延迟时间为 43.504 ps,拟合后理想延迟时间为

43.522 ps,二者相差较小。平均延迟时间的最大非线性误差为 -0.071 ps,非线性度仅为 0.163%。

THz-TDS 系统通过 FRODL 旋转,改变泵浦光和探测光之间的光程差,实现对 THz 不同位置时域

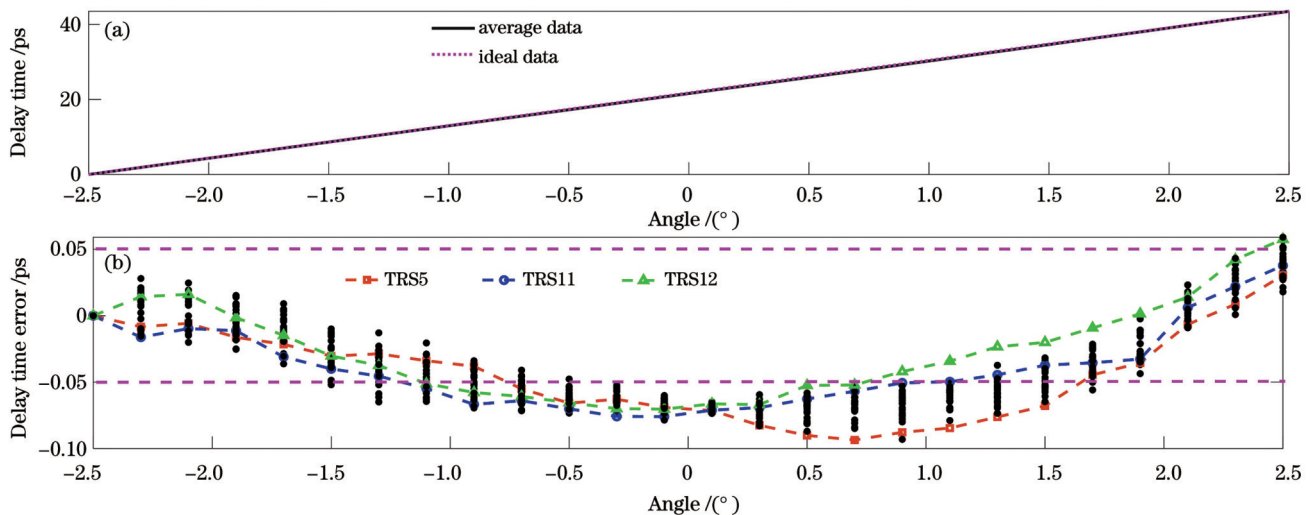


图 6 FRODL 测试结果。(a) TRS 的平均延迟时间;(b) TRS 延迟时间的非线性误差曲线

Fig. 6 Test results of FRODL. (a) Average delay time of TRS; (b) nonlinear error curves of TRS delay time

波形的采集。THz 信号采样波形重构时,每个 TRS 延迟时间的非线性误差均影响系统信号采样的准确性,因此 FRODL 还需要对转盘每个 TRS 的采样间隔进行标定。各 TRS 多次标定结果的平均非线性误差如图 6(b) 所示,该 FRODL 的 52.724% 的目标采样间隔非线性误差小于 0.05 ps,存在 47.276% 的采样间隔的非线性误差超过 0.05 ps,其中最大非线性误差为 0.094 ps, FRODL 的实际非线性度为 0.215%。

3.3 非线性校准

FRODL 工作过程中,各 TRS 对应的旋转角度由 16 位绝对式编码器(编码器角度精度可达 0.0055°)控制。电机转速为 5 Hz 时, FRODL 的扫描频率可达到 120 Hz,系统目标采样间隔为 0.1 ps,每个 TRS 的工作角度为 5° ,占空比为 33.3%,采集波形的理想延迟时间为 43.5 ps,采样频率为 156.6 kHz,每个 TRS 采集 435 个数据点,相邻采样点间对应的编码器角度相隔 0.0115° 。

THz-TDS 系统通过在探测飞秒激光脉冲和激发 THz 脉冲之间,利用 FRODL 引入可变时间延迟,实现对 THz 信号的采样,采集到的 THz 信号幅值 $E(t)$ 与飞秒激光脉冲入射时间 t 处的 THz 瞬时电流 $I(t)$ 成比例^[21]。FRODL 延迟时间的非线性误差将表现在 THz 幅值 $E(t)$ 大小上,为保证系统采集到的 THz 波形的准确性,需要对 FRODL 延迟时间的非线性误差进行校准。设标定实验中旋转角度为 γ ,基于迈克耳孙干涉标定技术,可获得每个 TRS 的实际延迟时间 $t_{si}(\gamma)$,以及 TRS 的平均实际延迟时间 $t_s(\gamma)$,通过对 TRS 平均实际延迟时间 $t_s(\gamma)$ 进行最小二乘拟合,获得 TRS 的理想延迟时间为 $T_s(\gamma)$ 。对图 6(a) 中理想延迟时间曲线 $T_s(\gamma)$ 进行反演,得到一条理想延迟时间 $T_s(\gamma)$ -旋转角度 γ 的曲线。由于 THz-TDS 目标采样间隔为 0.1 ps,可获得对应的采样点编码器角度 γ_i 。由于未校准前 FRODL 一般以采样点位置 γ_i 的理想延迟时间 $T_s(\gamma_i)$ 作为 THz 信号的时间横轴,由图 6(b) 中点线可知,在电机转速一定时, FRODL 旋转相同角度 TRS 产生的实际延迟时间间隔各不相同,每个 TRS 在采样位置 γ_i 的实际延迟时间 $t_{si}(\gamma_i)$ 与理想延迟时间 $T_s(\gamma_i)$ 存在非线性误差,因此由 $T_s(\gamma_i)-E[t_{si}(\gamma_i)]$ 曲线得到的 THz 波形幅值存在非线性误差。为校准这种误差,本文基于每个 TRS 延迟时间的标定结果 $t_{si}(\gamma)$,利用三次样条插值,获得每个采样点编码器角度 γ_i 位置对应的实际延迟时间 $t_{si}(\gamma_i)$,将采样点位置的实际延迟时间 $t_{si}(\gamma_i)$ 作为 THz 采集信号的横轴时间,同时采集编码器角度 γ_i 及对应的 THz 波幅值 $E[t_{si}(\gamma_i)]$,利用三次样条插值获得 $t_{si}(\gamma_i)-E[t_{si}(\gamma_i)]$ 曲线,实现对 FRODL 延迟时间的非线性误差的校准。

本文以图 6(b) 非线性误差中较为典型的 TRS5、TRS11 和 TRS12 为例进行说明。THz 时域信号校准前后的波形如图 7(a) 所示,为更好地显示出 FRODL 延迟时间误差对 THz 信号的影响,本文将图 7(a) 中采集到的 THz 信号在 19~20 ps 区间的峰谷部分进行放大。从同个 TRS 采集到的 THz 信号校准前后的位置对比可以看出,校准前后采样点的横向坐标发生了移动,由理想延迟时间 $T_s(\gamma)$ 变为了实际延迟时间 $t_{si}(\gamma_i)$ 。从不同 TRS 采集到的 THz 信号对比可以发现, THz 时域波形横轴位置校准前不仅与理想波形位置相差较大,各个 TRS 采集到的 THz 时域波形横轴位置也各异,而采用三次样条插值算法能够很好地校准不同 THz 时域波形的横轴时间。以校准前 19.5 ps 位置处的 THz 信号为例,可以看出校准后 THz 时域波形在该采样位置的实际延迟时间分别对应 19.450、19.412、19.432 ps,可表明在校准前该位置分别存在 0.050、0.088、0.068 ps 的误差。校准后 FRODL 延迟时间的非线性误差,由三次样条插值算法的误差精度决定,一般为插值函数的四阶余项,与 FRODL 实际延迟时间的非线性误差相比可近似为 0。

另外,由图 7(a) 可知,校准后的 $t_{si}(\gamma_i)-E[t_{si}(\gamma_i)]$ 曲线为非等间隔延迟时间曲线,非等间隔大小与图 6(b) 相关。非等间隔时域 THz 波形变换到频域谱,通常需要使用非等间隔的傅里叶算法^[22],如图 7(b) 所示,非等间隔时域 THz 波形傅里叶变换后的频谱与理想频谱相比,频谱吸收峰波动较大,频谱噪声较为明显。因此本文选择再次利用三次样条插值将非等间隔时域 THz 波形插值为理想延迟时间 $t_{si}(\gamma_i)-E[t_{si}(\gamma_i)]$ 曲线,如图 7(a) 和 7(b) 中点线所示,校准后的等间隔时域 THz 波形不仅保持了时域 THz 信号采样的准确性,同时具有频谱准确性^[23]。

4 结 论

本文提供了一个 FRODL 的设计思路,并利用仿真和实验验证了该 FRODL 结构的工作角度可达 5° 。基于偏振迈克耳孙干涉标定技术对 FRODL 实际延迟时间进行测试,实验结果表明,该 FRODL 的延迟时间大于 43.5 ps,校准前 FRODL 的最大误差为 0.094 ps,线性度可达到 99.785%。针对 THz-TDS 系统 THz 采集波形的非线性误差问题,利用三次样条插值法,得到每片 TRS 采样点编码器角度对应的实际延迟时间,通过记录编码器角度位置对应的实际延迟时间,对 THz 采样信号的非线性进行校准。校准后 FRODL 延迟时间误差,由三次样条插值算法的误差精度决定。利用三次样条插值对校准后的非等间隔时域 THz 波形进行等间隔插值,解决了非等间隔时域 THz 波形的频谱存在变换误差的问题。

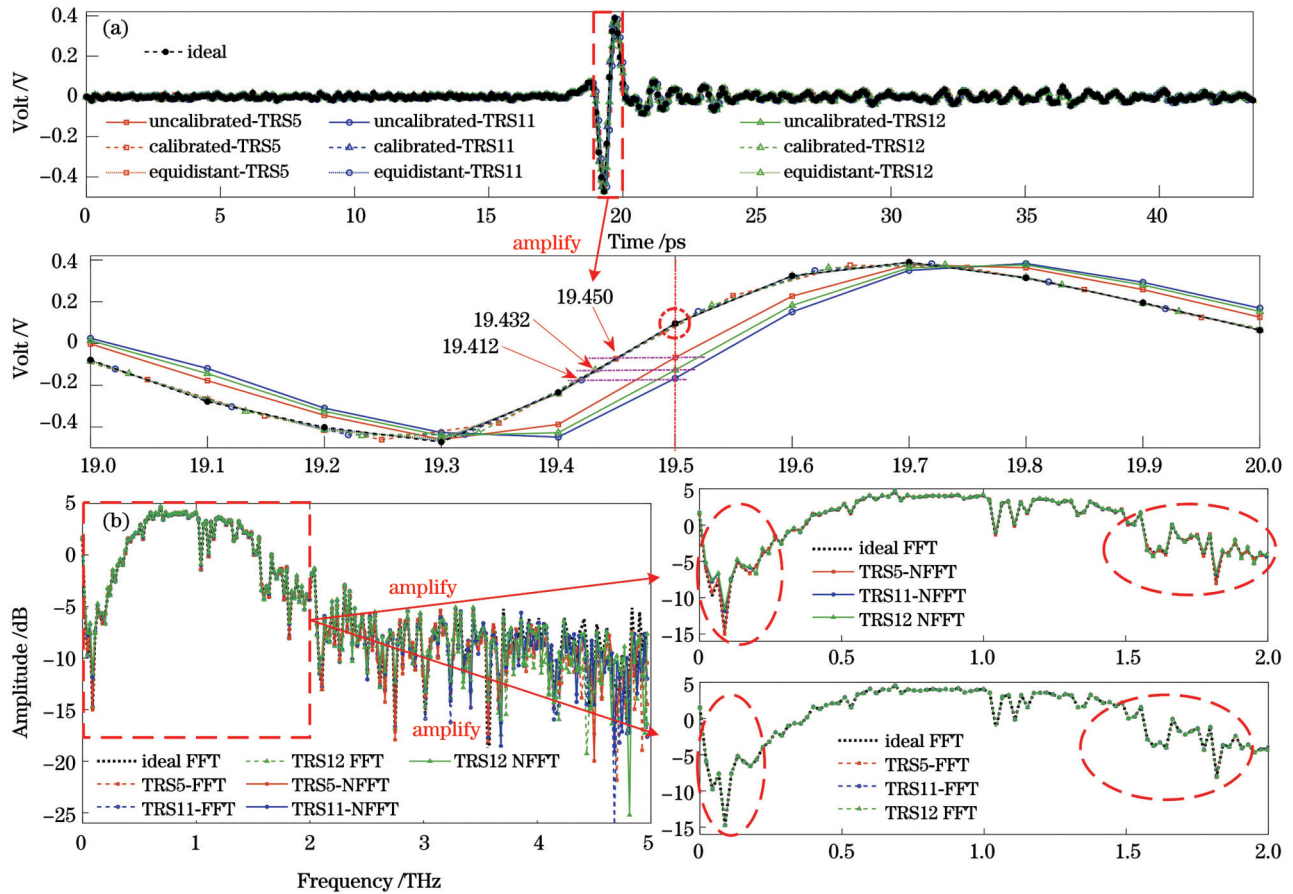


图 7 FRODL 非线性校准。(a)典型 TRS 非线性校准前后的 THz 时域波形；(b)典型 TRS 等间隔插值前后的 THz 波形频谱
Fig. 7 FRODL nonlinear calibration. (a) THz time-domain waveforms before and after typical TRS nonlinear calibration; (b) THz waveform spectrum before and after typical TRS equidistant interpolation

参 考 文 献

- [1] 王奇书, 牟达, 周桐宇, 等. 玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1712003.
Wang Q S, Mu D, Zhou T Y, et al. Terahertz nondestructive test of delamination defects in glass-fiber-reinforced composite materials[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1712003.
- [2] 顾健, 任姣姣, 张丹丹, 等. 基于多次回波数值模拟的涂层缺陷太赫兹无损检测[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1512007.
Gu J, Ren J J, Zhang D D, et al. Terahertz nondestructive testing of coating defects based on multiple echoes numerical simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1512007.
- [3] 江雪雷, 李恩恩, 许颖, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的钢材锈蚀产物光学参数测量及特征识别[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1112003.
Jiang X L, Li E E, Xu Y, et al. Optical parameter measurement and characteristic identification for corrosion products of steel materials based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1112003.
- [4] Gu J, Ren J J, Zhang D D, et al. Extraction of optical constants in the terahertz band using material dispersion models[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(5): 053001.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Kitahara H, Tani M, Hanyo M. High-repetition-rate optical delay line using a micromirror array and galvanometer mirror for a terahertz system[J]. The Review of Scientific Instruments, 2009, 80(7): 076104.
- [8] 王月宾. 基于螺旋面反射镜延迟线的实时显示 THz-TDS 系统[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Wang Y B. Real-time THz-TDS system based on helicoid reflective mirror optical delay line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [9] Kim G J, Jeon S G, Kim J I, et al. Terahertz pulse detection using rotary optical delay line[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(11): 7332-7335.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 辛胤杰, 李全勇, 孙伟, 等. 渐开线反射面光学延迟线的仿真和误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2312004.
Xin Y J, Li Q Y, Sun W, et al. Simulation and error analysis of involute reflector optical delay line[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2022, 59(23): 2312004.
- [13] Jahn D, Lippert S, Bisi M, et al. On the influence of delay line uncertainty in THz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016, 37(6): 605-613.
- [14] 董海龙, 汪家春, 赵大鹏, 等. 延迟线位置偏差对太赫兹时域光谱系统的测量不确定度影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(11): 3379-3384.
Dong H L, Wang J C, Zhao D P, et al. Analysis of measurement uncertainty in THz-TDS carried by delay-line position deviation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(11): 3379-3384.
- [15] Humphreys D A, Naftaly M, Molloy J F. Effect of time-delay errors on THz spectroscopy dynamic range[C]//2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), September 14-19, 2014, Tucson, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [16] Molter D, Trierweiler M, Ellrich F, et al. Interferometry-aided terahertz time-domain spectroscopy[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7547-7558.
- [17] Mamrashev A, Minakov F, Maximov L, et al. Correction of optical delay line errors in terahertz time-domain spectroscopy[J]. Electronics, 2019, 8(12): 1408.
- [18] 于溪畅, 高世杰, 吴佳彬, 等. 基于 MPLC 提高空间光-单模光纤耦合效率技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0906008.
Yu X C, Gao S J, Wu J B, et al. Research on MPLC-based technology to improve the coupling efficiency of spatial optical-single-mode fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0906008.
- [19] Wang H, Zhou D L, Wang Y, et al. Simulation for embedded-defects foam terahertz images of active bifocal terahertz imaging system at 0.22 THz based on geometric optics[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(6): 061102.
- [20] 高建秋, 孙建锋, 李佳蔚, 等. 基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801001.
Gao J Q, Sun J F, Li J W, et al. Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801001.
- [21] 熊中刚. 高灵敏度太赫兹光电导天线式选频探测研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
Xiong Z G. Research on high sensitivity terahertz photoconductive antenna frequency selection detection[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [22] Kruijzinga P, Mastik F, de Jong N, et al. Plane-wave ultrasound beamforming using a nonuniform fast Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(12): 2684-2691.
- [23] Klatt G, Gebbs R, Janke C, et al. Rapid-scanning terahertz precision spectrometer with more than 6 THz spectral coverage [J]. Optics Express, 2009, 17(25): 22847-22854.

Nonlinear Error Calibration Technique for Fast Rotating Optical Delay Lines

Zhu Lili^{1,2,3}, Xue Junwen³, Ren Jiaojiao^{1,2,3}, Zhang Dandan^{1,2,3}, Gu Jian^{1,2,3}, Zhang Jiyang³, Li Lijuan^{1,2,3*}

¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528403, Guangdong, China

Abstract

Objective As devices can change the relative delay time of reference light and detection light in optical detection systems, optical delay line (ODL) is widely employed in terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS), optical coherence tomography, ultrafast time resolution spectroscopy, and pump-probe technique. In particular, ODL is adopted to scan and detect THz-TDS signals by changing the relative delay of femtosecond and terahertz (THz) pulses in THz-TDS. As such, ODL is a key component that affects the accuracy, signal-to-noise ratio, and spectral resolution of THz signals. In the THz-TDS system, the ODL nonlinearity directly affects the accuracy and consistency of the sampling signal of the THz-TDS system. The nonlinear delay time change leads to the nonlinear actual sampling interval of the system, which brings the nonlinear change in the optical path of the femtosecond laser pulses (FLP) and thus causes the line position error of the THz spectrum. The greater nonlinear error of the THz sampling signal results in more severe distortion of the collected THz signals and greater difficulty in subsequent data processing. Therefore, it is urgent to solve the nonlinear problem of various rotating optical delay line (RODL) delay time. We design a fast rotating optical delay line (FRODL) composed of multiple turntable reflection surfaces (TRSs) and construct a polarized Michelson interference system. Based on the actual calibration results of the total delay time and delay time interval of the FRODL structure, nonlinear error calibration of the actual delay time of FRODL is achieved.

Methods We first design a FRODL composed of multiple TRSs and analyze the structure and working principle of FRODL. Then, the feasibility of the FRODL optical path is further verified, and the optical path structure of FRODL at different rotation angles is simulated to obtain the theoretical working angle of FRODL. Combined with the theoretical

mathematical model of FRODL, the theoretical delay time of FRODL is obtained, and the theoretical nonlinearity is fitted using the least squares method. Then, considering the signal ratio of the excitation signal, a fiber optic coupling structure is adopted. Based on the coupling power fluctuations during the actual coupling process of FRODL, the actual working range of FRODL is determined. Then, a polarization Michelson interferometer measurement system is built, and the delay time and delay time interval generated by the actual rotation angle of the TRS on each side of the FRODL are calibrated multiple times to obtain the average delay time of the TRS on each side of the FRODL. Additionally, the least squares method is adopted to fit the nonlinear error size and actual nonlinearity of the actual delay time interval. Finally, we also build the THz-TDS system, collect the THz signal under FRODL operation, and utilize the cubic spline interpolation algorithm to calibrate the nonlinear error of the THz signal.

Results and Discussions The designed FRODL structure consists of a turntable, a coupling lens, a focusing lens, and a planar reflector (Fig. 1). The simulation results show that the theoretical working range of FRODL is $[-2.5^\circ, 2.5^\circ]$ and the theoretical delay time can reach 43.522 ps. The fitted ideal delay time is 43.465 ps, and the sensitivity of the ideal delay time to rotation angle is 8.693 ps/°. The theoretical nonlinearity of FRODL is 0.304%, which means the linearity can reach 99.696% (Fig. 3). The calibration results of the polarization Michelson interferometer measurement system show that the average delay time of TRS is 43.504 ps, and the ideal delay time after fitting is 43.522 ps, with a small difference between the two values. The nonlinear error of the FRODL target sampling interval is 52.724% less than 0.05 ps, and there is a nonlinear error of 47.276% with a sampling interval exceeding 0.05 ps. The maximum nonlinear error is 0.094 ps, and the actual nonlinearity of FRODL is 0.215% (Fig. 6). Finally, by adopting cubic spline interpolation twice, we obtain the actual delay time of FRODL is matched with the sampling point signal and the calibrated THz equally spaced time-domain waveform (Fig. 7).

Conclusions We provide a design concept for FRODL and verify by simulation and experiments that the working angle of the FRODL structure can reach 5° . Based on polarization Michelson interference calibration technology, the actual delay time of FRODL is tested. The experimental results show that the delay time of the FRODL is greater than 43.5 ps, and the maximum error of the FRODL before calibration is 0.094 ps, with a linearity of 99.785%. To address the nonlinear errors in THz waveform acquisition in the THz TDS system, we employ the cubic spline interpolation method to obtain the actual delay time corresponding to the encoder angle of each TRS sampling point. By recording the actual delay time corresponding to the encoder angle position, the nonlinearity of the THz sampling signal is calibrated. The FRODL delay time error after calibration is determined by the error accuracy of the cubic spline interpolation algorithm. By leveraging cubic spline interpolation to perform equidistant interpolation on the calibrated non equidistant time-domain THz waveform, the spectral transformation error of the non-equidistant time-domain THz waveform is solved. The calibrated equidistant time-domain THz waveform not only maintains the accuracy of time-domain THz signal sampling but also has spectral accuracy.

Key words optical delay line; nonlinear calibration; terahertz time-domain spectroscopy system; delay time; nonlinear error