

便携式高速 FTIR 旋转式干涉仪数值模拟仿真分析

曲立国^{1,2,3}, 徐亮^{1*}, 刘建国¹, 冯明春⁴, 刘文清¹, 徐寒杨¹, 金岭¹¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002;⁴滁州学院机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000

摘要 旋转式干涉仪可实现便携式傅里叶红外光谱仪的小型化设计,同时可提供高速光谱输出,但其光程差存在非线性问题。本文详细分析了便携式傅里叶转换红外光谱(FTIR)旋转式干涉仪结构,建立参考坐标系,根据几何光学原理推导了转镜转动光程差方程,并进行了数值模拟仿真分析,阐明了干涉仪光程差与转镜厚度、折射率和转角参数间的设计关系。采用无参考激光采样方式,利用多项式拟合光程差与转角的非线性关系,获得等光程差对应的时间非均匀关系,从而实现非等时间下的等光程差采样。相比等时间采样方式光程差速度的不稳定性降低为原来的 1/5.3,这为转镜的速度控制提供更大不稳定性裕度,同时也提高了 FTIR 的抗振能力。该数值模拟仿真分析结果为实现无参考激光的便携式高速 FTIR 的设计参数确定和优化提供数据支持和理论依据。

关键词 傅里叶光学; 几何光学; 光程差; 便携式傅里叶红外光谱仪; 数值分析

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0907001

Numerical Simulation Analysis of Portable High-Speed FTIR Rotary Interferometers

Qu Liguang^{1,2,3}, Xu Liang^{1*}, Liu Jianguo¹, Feng Mingchun⁴, Liu Wenqing¹,
Xu Hanyang¹, Jin Ling¹¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;³School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China;⁴School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China

Abstract Rotary interferometers enable the miniaturization of portable Fourier infrared spectrometers and provide high-speed spectral output. However, their optical path difference (OPD) is nonlinear. In this paper, we analyzed the structure of a portable Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) rotary interferometer in detail and built a reference coordinate system. Then, an OPD equation for the rotating mirror was deduced according to the geometrical optics principle. Numerical simulation analysis was carried out to illustrate the relationship of OPD with the thickness, refractive index, and rotation angle of the rotating mirror. In terms of sampling without reference laser, the nonlinear relation between OPD and rotation angle was fitted by polynomials to obtain the time non-uniformity corresponding to equal OPD. As a result, the sampling with equal OPD in the case of non-equal time was achieved. Compared with that of the equal-time sampling, the instability of OPD velocity was reduced to 1/5.3,

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-10; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC016)、国家自然科学基金(41941011)、安徽省重点研究和开发计划(1804d08020300)

* E-mail: xuliang@aiofm, ac, cn

which offered a greater instability margin for the speed control of the rotating mirror and also improved the vibration resistance of FTIR rotary interferometers. Our work provides data support and theoretical basis for the design parameter determination and optimization of portable high-speed FTIR rotary interferometers without reference laser.

Key words Fourier optics; geometrical optics; optical path difference; portable Fourier infrared spectrometer; numerical analysis

OCIS codes 070.4790; 080.2740; 120.6200; 190.4360

1 引言

傅里叶变换红外光谱(FTIR)技术凭借分辨率高、光谱范围宽、可以同时反演多组分等优点,已经广泛应用在环境监测、科学研究、工农业生产、航空航天遥感等领域^[1-3]。工业现场应用要求 FTIR 具有便携性、抗振性和快速实时检测能力,以满足执行突发性应急监测任务的需求^[4-5]。干涉仪是 FTIR 的核心部件,传统干涉光谱仪主要有迈克尔孙干涉仪、法布里-珀罗干涉仪和双折射型干涉仪等。经典的傅里叶变换光谱仪是时间调制型迈克尔孙干涉仪,采用动镜直线运动方式,快速运动下的动镜高精度直线驱动与定镜间的准直要求使其难以适应恶劣的工业现场^[6]。为此出现了摆扫式和旋转式 FTIR 光谱仪^[6-8],由摆镜替代直线往复运动的动镜,摆扫式干涉光谱仪采用对称布局和角镜结构,在较小摆角下可以获得较大的光程差(OPD),也可以满足一定抗振性,但动镜还是要采用往复运动,检测速度受限^[9]。Dybwad^[10]提出折射转动扫描干涉仪,光程差通过动镜转动部件产生,折射转动扫描干涉仪采用动镜转动代替直线运动来实现光程差的改变,能够克服动镜在直线运动中带来的光路倾斜和速度波动大的影响,因此具有良好的抗干扰性和稳定性,同时转镜以高速做旋转运动,光路结构紧凑,非常适合便携式高速 FTIR 实现,工业现场可搭载无人机实现远程移动监测,同时可以针对化工厂气体泄漏进行快速定位监测。

但旋转式干涉仪也存在一些缺陷,其光程差受限于转镜厚度和旋转角度,且 OPD 与旋转角度不呈线性关系,随着旋转角度增加,线性度变差^[11]。文献[11]分析了旋转式干涉仪转镜和定镜的安装误差容限,阐明系统对转镜的晃动不敏感,说明了该型干涉光谱仪的抗干扰能力很强。但是对转镜速度的稳定性有着较高的要求,文中关于光程差非线性处理方法是假设转镜有效工作角度较小,可近似地进行线性等效,但是这样会减小光程差范围,降低 FTIR 的分辨率。为此本文分析旋转式干涉仪光程

的非线性特点,阐明光程差与转镜参数(厚度、折射率和旋转角度)之间的关系,在不增加干涉仪体积的条件下,尽可能地利用大转角范围获得更大的光程差,同时研究非等时间的无参考激光的采样方案,为实现小型化 FTIR 设计提供数据支持和理论依据。

2 基本原理

2.1 FTIR 傅里叶变换原理

进入干涉仪后,入射的不同波段的复色光将会在探测器处形成干涉图。根据文献[12]可知干涉图与单色光之间关系为

$$I(x) = 2 \int_0^{\infty} I_0 [1 + \exp(-i2\pi\nu x)] d\nu = 2I_0 + 2I_0 \int_0^{\infty} \exp(-i2\pi\nu x) d\nu. \quad (1)$$

(1)式由直流和交流两部分组成,对光谱测量来说,取相干调制的交流信号作为干涉图。则干涉图为

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\nu) \exp(i2\pi\nu x) d\nu. \quad (2)$$

这样就建立了光谱分布 $B(\nu)$ 与干涉图 $I(x)$ 之间的对应关系。FTIR 光谱仪将包含有吸收物质光谱特征的入射光调制成交涉图并探测,根据(2)式,干涉图又可以通过下式还原为光谱 $B(\nu)$ 。

$$B(\nu) = \int_0^{\infty} I(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx. \quad (3)$$

(2)式和(3)式是傅里叶变换光谱学的基本方程。即:干涉图 $I(x)$ 为光程差 x 的函数,光谱 $B(\nu)$ 为波数 ν 函数,通过傅里叶变换可以实现干涉图 $I(x)$ 和其相应光谱 $B(\nu)$ 的相互转换。并将光谱结果以吸光度或透射率与波数的关系输出,最后基于朗伯-比尔定律采用最小二乘法进行红外光谱的定量分析,反演特定波段上的气体浓度。

根据傅里叶变换性质,其中(3)式要实现干涉的等光程差采样,才能获得有效的光谱图,光程差越大,光谱分辨率越高^[13]。经典迈克尔孙干涉仪的直线型动镜驱动系统,其光程差与动镜位移是线性关系,光程差大、分辨率高,但是要求动镜和定镜保持高度的准直性,结构复杂、稳定性差,为了获得等光程差采样,会采用辅助 He-Ne 激光产生的干涉信号过零

点进行触发采样, He-Ne 激光增加了光路体积, 尤其不适宜于便携、快速变化的光谱测量应用^[14]。

2.2 旋转式 FTIR 干涉仪

旋转扫描式干涉仪结构如图 1 所示, M1~M4 为固定反射镜, 旋转镜为透射镜, 围绕 N 点旋转, 使两束干涉光产生光程差。设红外光源产生平行入射光线在分束片上的入射点为 O 点, 其中第一束光经分束器反射后经由 A 点、N 点到达定反射镜 M3 的 B 点, 然后沿原光路返回 O 点; 同时, 透射过分束器的第二束光线经由 C 点、N 点到达定反射镜 M4 的 D 点, 反射后也沿原光路返回 O 点。第一束返回光线经分束片透射, 第二束返回光线经分束片反射, 此时两束光发射干涉。转镜旋转在两束光之间产生光程差, 实现干涉信号的时间调制, 调制频率取决于转镜旋转速度。

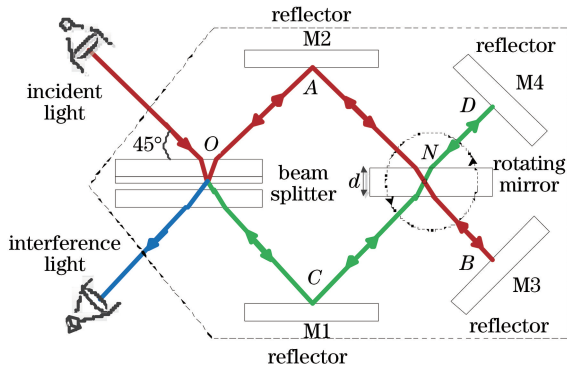


图 1 旋转式扫描干涉仪

Fig. 1 Rotary scanning interferometer

3 光程差计算分析

3.1 光程差计算

以转镜中心点为原点, 建立如图 2 所示的参考坐标系, 进行 $(-45^\circ, 45^\circ)$ $(45^\circ, 135^\circ)$ $(135^\circ, 225^\circ)$ $(225^\circ, 315^\circ)$ 四象限光程差计算。

根据参考文献[8], 如图 3 所示, 设转镜初始位置水平, 转镜折射率为 n , 厚度为 d , L_1 与 L_2 初始入射角 r_1 与 r_2 为 45° , 转镜逆时针转动 θ 角度, 那么两束光的入射角 r_1 与 r_2 分别由初始的 45° 变为

$45^\circ - \theta$ 和 $45^\circ + \theta$, 对应的各自折射角分别记为 α 和 β , 根据折射定律, $n = \frac{\sin r_1}{\sin \alpha}$, L_1 与 L_2 在转镜介质中的光程 l_1 和 l_2 分别为 $n \cdot \overline{OB}$ 和 $n \cdot \overline{NE}$ 。相应的空气中的光程 l_3 和 l_4 分别为 \overline{OA} 和 \overline{NF} 。根据折射定律, $\frac{\sin(45^\circ - \theta)}{\sin \alpha} = n$, $\frac{\sin(45^\circ + \theta)}{\sin \beta} = n$; 对应的

介质中的光程分别为 $l_1 = \frac{n \cdot d}{\cos \alpha}$, $l_2 = \frac{n \cdot d}{\cos \beta}$, 空气中的光程相应减少 $l_3 = \frac{d \cdot \cos(45^\circ - \theta - \alpha)}{\cos \alpha}$, $l_4 = \frac{d \cdot \cos(45^\circ + \theta - \beta)}{\cos \beta}$ 。由于 L_1 与 L_2 原光路返回, 所以光程差 δ 为

$$\delta = 2[(l_2 - l_4) - (l_1 - l_3)]。 \quad (4)$$

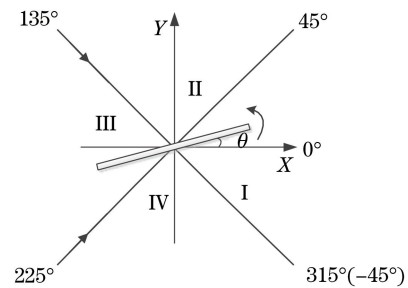


图 2 参考坐标系

Fig. 2 Reference coordinate system

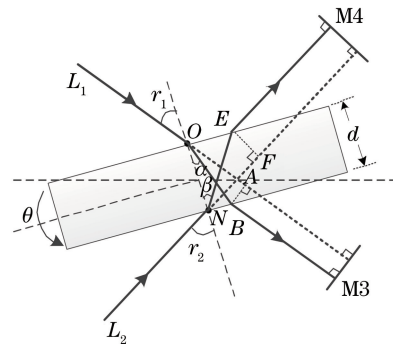


图 3 转镜光路图

Fig. 3 Optical path diagram of rotating mirror

1) 当 $-45^\circ < \theta < 45^\circ$ 时, 入射角 $r_1 = 45^\circ - \theta$, $r_2 = 45^\circ + \theta$ 。

$$\delta = 2(l_2 - l_4 - l_1 + l_3) = 2d \left[\frac{n}{\cos \beta} - \frac{\cos(45^\circ + \theta - \beta)}{\cos \beta} - \frac{n}{\cos \alpha} + \frac{\cos(45^\circ - \theta - \alpha)}{\cos \alpha} \right]。 \quad (5)$$

将(5)式化简得:

$$\frac{n}{\cos \beta} = \frac{n}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} = \frac{n}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(45^\circ + \theta)}{n^2}}} = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta}}, \quad (6)$$

$$\frac{\cos(45^\circ + \theta - \beta)}{\cos \beta} = \left[\cos(45^\circ + \theta) + \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta}{\sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta}} \right], \quad (7)$$

$$\frac{n}{\cos \alpha} = \frac{n}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} = \frac{n}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(45^\circ - \theta)}{n^2}}} = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta}}, \quad (8)$$

$$\frac{\cos(45^\circ - \theta - \alpha)}{\cos \alpha} = \left[\cos(45^\circ - \theta) + \frac{\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta}{\sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta}} \right]. \quad (9)$$

将(6)~(9)式代入(5)式,得到

$$\delta = 2d \left[\cos(45^\circ - \theta) - \cos(45^\circ + \theta) + \frac{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta}{\sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta}} - \frac{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta}{\sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta}} \right] = 2d \left[\sqrt{2} \sin \theta + \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta} - \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta} \right]. \quad (10)$$

2) 当 $45^\circ < \theta < 135^\circ$ 时, 入射角 $r_1 = \theta - 45^\circ, r_2 = 135^\circ - \theta$ 。

$$\delta = 2d \left[\sqrt{2} \cos \theta + \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta} - \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta} \right]. \quad (11)$$

3) 当 $135^\circ < \theta < 225^\circ$ 时, 入射角 $r_1 = 225^\circ - \theta, r_2 = \theta - 135^\circ$ 。

$$\delta = 2d \left[-\sqrt{2} \sin \theta + \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta} - \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta} \right]. \quad (12)$$

4) 当 $225^\circ < \theta < 315^\circ$ 时, 入射角 $r_1 = \theta - 225^\circ, r_2 = 315^\circ - \theta$ 。

$$\delta = 2d \left[-\sqrt{2} \cos \theta + \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\theta} - \sqrt{n^2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta} \right]. \quad (13)$$

(10)~(13)式为根据参考坐标系得到的四象限光程差。

3.2 光程差分析

根据(10)式~(13)式, 仿真光程差变化曲线如图 4 所示, 随着角度和折射率的不同, 光程呈现明显

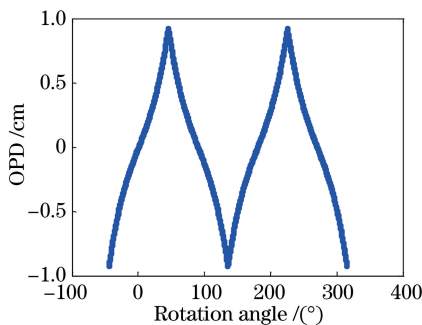


图 4 旋转周期内光程差变化曲线

Fig. 4 Variation curve of optical path difference during rotation period

的非线性, 光程差在旋转一周的四象限内重复对称出现, 即一周输出 4 条光谱。以下分析以第一象限为例, 在较小转角范围内, 光程差曲线呈现较好的线性度, 图 5 为光程随折射率和角度变化曲线图, 增大转镜的折射率或者增加转角范围都会增加光程差, 不同折射率下光程差非线性度有很大区别。

在固定转镜厚度情况下, 模拟折射率从 2.0 到 3.2 开始增加, 在转角 $\pm 20^\circ$ 内对光程差曲线进行直线拟合, 图 6 为拟合误差平方曲线图, 图 7 为不同折射率下光程差曲线一阶导数变化曲线。从图 6 可以看出, 随着折射率增加, 拟合误差平方曲线波动变小, 折射率到 2.8 达到最小, 但是如果折射率继续增加则曲线波动又开始变大。图 7 也证明了当折射率 $n = 2.86$ 时, 在 $\pm 20^\circ$ 内光程差曲线斜率近似恒定值, 意味着这段区间具有良好的线性度。偏离 2.86 的曲线线性度明显变差。实际应用中, 只能选择接近最佳折射率的晶体。

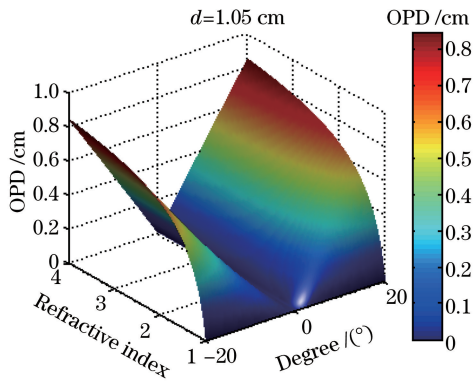


图 5 光程随折射率和角度变化曲线

Fig. 5 Optical path variation curve with refractive index and angle

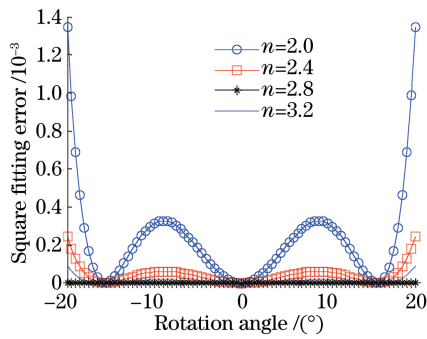


图 6 光程差线性拟合误差平方

Fig. 6 Square of optical path difference linear fitting error

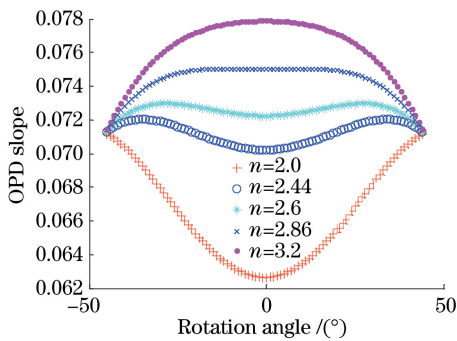


图 7 不同折射率光程曲线一阶导数

Fig. 7 First derivative of optical path curves with different refractive indices

在同样转速下,同样工作角范围内,旋转镜厚度越厚,光程差越大,光谱分辨率也越高,但 OPD 变化的速度也越快,需要更高的采集卡采集速率,从而面临数据采集卡选型困难。如果不增加厚度,仅增加转角范围,光程差依然可以增加,但也会增大光程差非线性度,同时也要增加转镜的直径。由于转镜旋转,导致转镜有效面积变化,光通量随着相位差发生变化,而且旋转导致其发生周期性变化,这会干涉图强度,进而影响光谱信噪比。假设选择如下

参数进行设计:转镜厚度为 10.5 mm,转镜直径为 78 mm,转镜折射率为 2.4,将以上参数代入(5)式进行光程差分析,经过直线拟合后,输出线性拟合残差如图 8 所示。

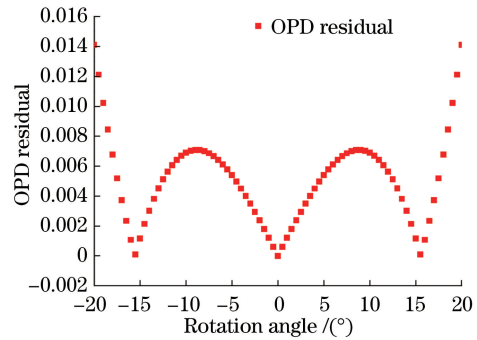


图 8 线性拟合残差

Fig. 8 Linear fitting residual

从 OPD residual 上看,转角 15.5°为误差反转点。在转角 18°以内为可以接受的误差范围。因此,最优工作角度在 ±15.5°,最大允许工作角度在 ±18°,对应的分辨率如下:最优分辨率为 1.53 cm⁻¹,最大分辨率为 1.78 cm⁻¹。

由于无参考激光设计,采样光程差误差主要来自转镜光程差的非线性和转镜速度的不稳定,其中转镜速度的稳定度控制依赖转镜的电机驱动控制技术,但是为了提高转镜 FTIR 工作环境的适应性(例如搭载在无人机上应用),给驱动控制提供更大的速度控制裕量,必须要在采样策略上进行优化,尽可能减小采样光程差误差。为了解决光程差非线性问题,实现无参考激光的等光程差采样,可采用变速等时间间隔采样或者匀速变时间间隔采样,光程变化率和角速度关系为

$$V_{\delta} = \frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{d\delta(t)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}, \quad (14)$$

$$\theta = \int \omega(t) dt, \quad (15)$$

$$\Delta\delta_i = \delta_i \cdot \omega(t) \cdot \Delta t = K, \quad (16)$$

式中:V_δ 为光程差变化率;ω 为角镜旋转角速度;Δδ_i 为光程差采样间隔;K 为常数(根据分析光谱波段范围,要求满足香农采样定理);δ_i 为光程差变化速率。在转镜厚度和折射率固定情况下,光程差速度取决于转镜驱动电机的转动速度。

如果省略参考激光光路设计,则可以提高旋转式 FTIR 的便携性,但这样就对傅里叶变换的等光程差采样需求提出了很大的挑战,如果光程差呈线性,则假设转镜角速度为匀速,此时利用等时间采样即可实现等光程差采样。根据以上选取的转镜参

数,对±20°转角范围内的光程差曲线进行直线拟合(图 9)和三次多项式拟合(图 10),图中星型曲线为拟合残差。

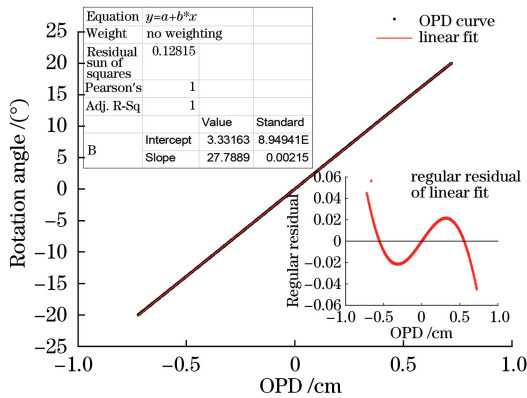


图 9 光程差直线拟合及残差

Fig. 9 Optical path difference linear fitting and residual error

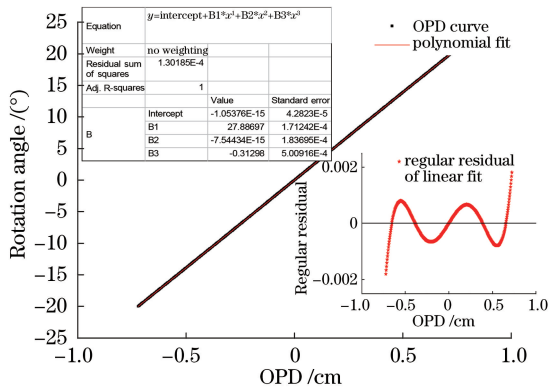


图 10 光程差多项式拟合及残差

Fig. 10 Optical path difference polynomial fitting and residual error

$$\theta = -(1.054 \times 10^{-15}) + 27.887\delta - (7.544 \times 10^{-15})\delta^2 - 0.313\delta^3. \quad (17)$$

干涉仪光程差的均匀扫描调制要求光程差的速度 v 为匀速。光程差速度的均匀性一般用光程差速度稳定度来定量描述。

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\delta_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i}. \quad (18)$$

如(18)式所示,首先定义光程差速度的不稳定性 α , α 是干涉仪角镜在有效光程范围内所有光程差速度采样的标准差与均值的比值,一般要求 $\alpha < 1\%$ ^[15];光程差速度的稳定度定义为 $(1-\alpha)$,一般要求 $(1-\alpha) > 99\%$ 。

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\delta_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i}. \quad (19)$$

旋转角度范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$, 采样点数设为 4000, 根据(10)式、(17)式和(18)式分别采用等时间采样和非等时间采样(假设转镜匀速, 根据(15)式和(17)式计算采样时间点)计算 $\Delta\delta_i$, 如图 11 所示, 采用等时间采样光程差速度的不稳定性 $\alpha = 0.45\%$ (对应标准差为 1.6307×10^{-6} , 稳定度为 99.55%), 而采用非等时间采样 $\alpha = 0.085\%$ (对应标准差为 3.2307×10^{-7} , 稳定度为 99.915%), 相比于等时间采样 α 降低为原来的 1/5.3。

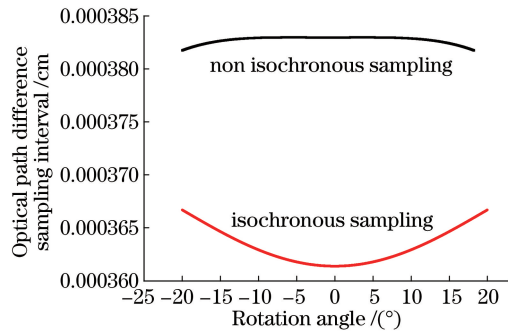


图 11 光程差采样间隔

Fig. 11 Optical path difference sampling interval

上述分析说明了单色光在转镜干涉仪中的光程差特性, 由于 FTIR 的宽波段特性(例如波段范围为 $7 \sim 14 \mu\text{m}$), 根据光色散特性, 同一材料的转镜, 对不同频率的光具有不同的折射率, 不同的单色光会有不同光程差和线性程度^[16]。中红外波段常用窗片材料有硒化锌(ZnSe)、溴化钾(KBr)和氟化钙(CaF₂), 其中 ZnSe 的折射率最大, 中红外波段 ZnSe 折射率变化如表 1 所示。转镜干涉仪采用 ZnSe 作为旋转镜材料, 旋转角度下可获得较大的光程差, 截取波段范围 $7.0 \sim 14.2 \mu\text{m}$, 折射率从 2.4218 下降到 2.3744, 折射率变化了 0.0474, 根据光程差的非线性分析可忽略 0.0474 折射率变化产生的色散影响。

4 结 论

旋转式干涉仪结构紧凑, 可实现便携式傅里叶红外光谱仪的小型化设计, 针对旋转式傅里叶光谱仪存在的光程差扫描非线性问题, 采用几何光学方法, 建立转镜光程差方程, 并进行了数值仿真分析。

表 1 中红外波段 ZnSe 折射率

Table 1 Refractive index of ZnSe in medium infrared band

Wavelength / μm	Refractive index	Wavelength / μm	Refractive index
1.0	2.4892	9.0	2.4122
2.2	2.4437	9.8	2.4077
2.6	2.4401	10.2	2.4053
3.0	2.4376	11.0	2.4001
4.2	2.4324	12.2	2.3915
4.6	2.4309	13.0	2.3850
5.0	2.4295	14.2	2.3744
6.2	2.4251	15.0	2.3665
6.6	2.4235	16.2	2.3534
7.0	2.4218	17.0	2.3448
8.2	2.4163	18.2	2.3278

根据光程差方程可知,转镜旋转一周内会四次经过零光程点,意味着一周可以输出四幅干涉图,这将极大地提高 FTIR 工作速度。光程受限于转镜厚度、折射率和旋转角度,通过仿真分析可知,当折射率在 2.86 时,光程差线性度最好。较大的旋转角度可以获得较大的光程差,但是非线性度也随之提高。为了实现无参考激光的便携式 FTIR 设计,本文采用多项式对给定角度范围内的光程曲线进行拟合,然后根据拟合曲线采用变时间采样方案对光程差进行采样,相比等时间采样方式光程差速度的不稳定性降低为原来的 1/5.3,这为转镜的速度控制提供更大不稳定性裕度,同时也提高了 FTIR 的稳定度。本文数值仿真分析结果为实现旋转式 FTIR 光谱仪设计提供了很好的数据支持和理论依据,基于该理论分析可开展后续实验工作。

参 考 文 献

- [1] Liu L X, Mandelis A, Huan H T, et al. Fourier-transform infrared differential photoacoustic spectroscopy (FTIR-DPAS) for simultaneous monitoring of multiple air contaminants/trace gases [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39(8): 1-7.
- [2] de Ninno A, Nikollari E, Missori M, et al. Dielectric permittivity of aqueous solutions of electrolytes probed by THz time-domain and FTIR spectroscopy [J]. *Physics Letters A*, 2020, 384(34): 126865.
- [3] Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, et al. Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0500001.
刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境监测领域中光谱学技术进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0500001.
- [4] Fiocco G, Invernizzi C, Grassi S, et al. Reflection FTIR spectroscopy for the study of historical bowed string instruments: invasive and non-invasive approaches [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 245: 118926.
- [5] Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, et al. On-line monitoring technology and applications for air pollution and environmental safety [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(2): 82-92.
刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境污染与环境安全在线监测技术进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(2): 82-92.
- [6] Zhao B W, Xiangli B, Cai Q S, et al. Fourier transform spectrometer based on rotating parallel-mirror-pair[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(11): 3209-3213.
赵宝玮, 相里斌, 才啟胜, 等. 平行双转镜傅里叶变换光谱仪[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(11): 3209-3213.
- [7] Cai Q S, Xiangli B, Fang Y, et al. Principle and tolerance analysis of a rotating parallel-mirror-pair spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0512001.
才啟胜, 相里斌, 方煜, 等. 平行转镜式光谱仪原理与误差容限分析[J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 0512001.
- [8] Feng M C, Liu W Q, Xu L, et al. Optical path difference analysis and simulation of four typical rotary type interferometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(11): 3214-3219.
冯明春, 刘文清, 徐亮, 等. 四种典型旋转型干涉仪的光程差分析和仿真[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(11): 3214-3219.
- [9] Xie Y T, Zhang Y J. OPD scanning model of the swing arm interferometer and its simulation [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(7): 821-824.
谢运涛, 张玉钧. 摆臂式干涉仪光程差扫描模型及其仿真[J]. *激光与红外*, 2015, 45(7): 821-824.
- [10] Dybwad J P. Refractively scanned interferometer: US9202299W[P]. 1978-04-29.
- [11] Yang X X, Zhou S Z, Xiangli B, et al. Studies of error limited of high speed rotary spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3): 338-341.
杨晓许, 周泗忠, 相里斌, 等. 转镜式干涉光谱仪中的误差容限研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(3): 338-341.
- [12] Griffiths P R, de Haseth J A. *Fourier transform infrared spectrometry*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

- [13] Guo L L, Zhao Q C, Yang Y, et al. Method for suppression of impulse noise in spaceborne Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0830003.
郭玲玲, 赵其昌, 杨勇, 等. 星载傅里叶变换红外光谱仪的脉冲噪声抑制方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0830003.
- [14] Feng M C, Xu L, Wang Y J, et al. Collimation factors and performance analysis based on Michelson interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 132201.
冯明春, 徐亮, 王玉杰, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的准直因素及性能分析研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 132201.
- [15] Duan P F, Li M, Xu P M, et al. Influence on velocity uniformity of interferometer mechanism of micro-vibration [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(6): 44-50.
段鹏飞, 李明, 徐彭梅, 等. 微振动对干涉仪运动机构均匀性的影响分析 [J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(6): 44-50.
- [16] Gao B, Li Q, Liu A, et al. Measuring refractive index of transparent plate by low-coherent interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0804004.
高波, 李强, 刘昂, 等. 基于短相干技术的光学平板折射率测量方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0804004.