

微小型傅里叶变换光谱仪波前像差分析与光谱修正

吕金光¹, 梁静秋^{1*}, 梁中翥¹, 秦余欣^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了进一步实现傅里叶变换光谱仪的微小型化, 在基于多级微反射镜的傅里叶变换光谱仪结构中引入微透镜阵列, 利用微透镜阵列对由多级微反射镜调制的各级次的干涉光场单元进行同步收集。光场相位采用空间调制的方式, 因此系统的波前像差会导致各级次干涉光场单元的波前产生不同程度的畸变。建立含有波前像差的光场与多级微反射镜和微透镜阵列相互作用的标量衍射理论模型, 计算表明波前像差会导致各级次干涉像点的强度产生不同程度的衰减, 同时在复原光谱中引入低频噪声。通过分析发现, 干涉像点强度的衰减是各干涉光场单元波前像差的斯特列尔比调制的结果, 且复原光谱中的低频噪声主要源于斯特列尔比的傅里叶谱。根据波前像差对干涉图像的调制特点, 提出了一种利用波前像差的斯特列尔比对干涉光强进行修正的方法, 计算表明该方法可以使复原光谱的失真得到有效改善。

关键词 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 微透镜阵列; 波前像差; 斯特列尔比; 相位误差

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0230001

Wavefront Aberration Analysis and Spectrum Correction of Microminiature Fourier Transform Spectrometer

Lü Jinguang¹, Liang Jingqiu¹, Liang Zhongzhu¹, Qin Yuxin^{1,2}

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to realize the microminiaturization of the Fourier transform spectrometer (FTS) further, the micro lens array is introduced to FTS based on stepped micro-mirrors, which is used to collect each interference optical field unit modulated by stepped micro-mirrors synchronously. Because of the spatial modulation mode, the system wavefront aberration causes the wavefront distortion of each interference optical field unit. The scalar diffraction model of the interaction between the optical field with wavefront aberration and the stepped micro-mirrors, and the micro lens array is built. By means of calculation, the wavefront aberration is found impairing the intensity of each point in interference image at different levels, and introducing the low-frequency spectrum noise to the recovered spectrum. The analyses show that the intensity attenuation of interference image points results from the intensity modulation by wavefront aberration Strehl ratio of each interference optical field unit, and the low-frequency spectrum noise is mainly from the Fourier spectrum of Strehl ratio. According to the modulation characteristic of the wavefront aberration on interferogram, a method that using the wavefront aberration Strehl ratio to correct the interferogram intensity is proposed. The results indicate that this method improves the distortion of the recovered spectrum effectively.

Key words spectroscopy; Fourier transform spectrometer; micro lens array; wavefront aberration; Strehl ratio; phase error

OCIS codes 300.6190; 300.6300; 080.1010; 070.7345

收稿日期: 2017-08-24; 收到修改稿日期: 2017-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61627819, 61575193, 61376122, 61727818, 61735018)、吉林省科技发展计划(20150520101JH, 20150204072GX, 20150101049JC, 20170204077GX)、中国科学院青年创新促进会基金

作者简介: 吕金光(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事微小光学系统设计与光学信息处理方面的研究。E-mail: jinguanglv@163.com

*通信联系人。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

1 引 言

傅里叶变换光谱仪由于具有多通道、高通量、高精度和低杂光等优点,在化学分析、药品检测、食品安全、生物工程以及生命科学等领域得到了日益广泛的应用^[1-2]。近年来,随着一些高新科学技术领域的出现和发展,如空间探测、资源勘探、环境监控、气象监测等领域的科学研究和工程应用,特殊的应用环境和使用需求对傅里叶变换光谱仪的微型化提出了迫切的使用需求。因此,国内外许多科研机构积极开展基于新原理与新结构的微型傅里叶变换光谱仪的研究。瑞士纽沙特尔微技术研究所对基于倾斜平面镜迈克耳孙干涉具的微型光谱仪进行了研究,实现了信号的宽光谱探测,但探测器像元的尺寸限制了系统的光谱分辨率^[3]。瑞典中部大学研制了一种基于阶梯形和楔形法布里-珀罗干涉具的微型光谱仪,实现了高分辨率的光谱测量,但由于系统的波长选择性,只能进行单波长或窄带光谱信号的探测^[4]。本课题组利用两个多级微反射镜代替迈克耳孙干涉仪中的平面动镜,实现了干涉系统的微型化^[5],用于干涉图像接收的缩束系统采用开普勒双远心光路结构,由物镜和目镜组成,当物镜的焦距为 f_1 、目镜的焦距为 f_2 时,缩束系统的总长度为 $f_1 + 2f_2$,超过了 100 mm^[6],具有较大的体积和质量。为了进一步实现傅里叶变换光谱仪的微型化,在基于多级微反射镜结构的傅里叶变换光谱仪基础上,引入微透镜阵列取代缩束系统对各级次的干涉光强进行同步采集。当微透镜阵列的焦距为 f 时,接收系统的总长度为 f ,本文中 f 取 16 mm,与原系统相比,该系统具有更小的体积和质量。当利用微透镜阵列对横向分布的各级次干涉光场单元进行同步接收时,系统的波前像差会导致干涉光场的波前产生畸变,进而影响干涉图像的能量分布与复原光谱的质量。为此,针对该微型傅里叶变换光谱仪中波前像差对干涉图像与复原光谱产生的影响进行分析,并提出了有效的光谱修正方法。

2 系统工作原理

基于多级微反射镜与微透镜阵列设计了微型傅里叶变换光谱仪,其光学结构如图 1 所示。两个多级微反射镜对由光学准直系统出射的光场进行空间相位调制^[7-9],微透镜阵列对干涉图像进行同步接收。两个多级微反射镜将入射光场在横向空间上分割成许多个单元,每个光场单元对应着两个多级微

反射镜特定的行阶梯与列阶梯,从而对应一个特定的相位差。设两个多级微反射镜的阶梯级数均为 N ,其中横向多级微反射镜的阶梯步长为 d ,为了满足光程差互补原则,纵向多级微反射镜的阶梯步长为 $N \times d$,则横向多级微反射镜的第 m 个阶梯与纵向多级微反射镜的第 n 个阶梯对入射光场调制产生的光程差(OPD)为 $\Delta(m, n) = 2(Nn - m)d$ 。如图 1 所示,其右图以 $N = 4$ 为例示意了光程差的空间分布情况,其中 $s = 2d$ 为光程差的采样间隔。因此,由两个多级微反射镜形成的第 (m, n) 个干涉光场单元所对应的相位差 $\varphi(m, n)$ 为

$$\varphi(m, n) = 2\pi\nu\Delta(m, n) = 4\pi\nu(Nn - m)d, \quad (1)$$

式中 $\nu = 1/\lambda$ 为光波的波数, λ 为光波的波长。

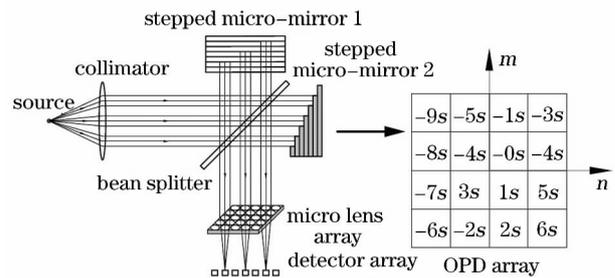


图 1 微型傅里叶变换光谱仪原理图

Fig. 1 Principle diagram of microminiature Fourier transform spectrometer

被多级微反射镜调制形成的干涉光场由微透镜阵列对各级次的干涉光场单元进行同步收集,然后由探测器阵列获得干涉图像。干涉图像为各干涉级次所对应的特定相位差的干涉像点阵列,将干涉像点阵列与光程差进行配准,便可得到对应相位差分布的干涉图像函数 $I(m, n)$ 。滤除干涉图函数直流分量,然后对其进行离散傅里叶变换运算,反演得到入射光信号频域的光谱信息,即

$$B(\nu) = 2d \sum_m \sum_n [I(m, n) - \langle I(m, n) \rangle] \cdot \exp[-j2\pi\nu \cdot 2(Nn - m)d], \quad (2)$$

式中 $\langle I(m, n) \rangle$ 为干涉图函数的直流分量数, j 为虚数单位。

3 系统建模与数值计算

3.1 光波场传播建模

在理想情况下,由光学准直系统出射的光束是传播方向与光轴平行的平面波,被分束器分束后会垂直入射到正交放置的两个多级微反射镜上。但系统像差的存在会导致其出瞳面上的波前相对于理想的平面波前存在一定的畸变。光学准直系统的出瞳

位于多级微反射镜上,设系统的出瞳直径为 D ,系统的波像差函数为 $W(x, y)$,则入射到多级微反射镜上的光场可以表示为

$$u_0(x, y) = \text{circ}\left[\sqrt{x^2 + y^2}/(D/2)\right] \cdot \exp[j2\pi\nu W(x, y)]. \quad (3)$$

当光场入射到两个多级微反射镜上时,两个多级微反射镜利用其阶梯结构对入射光场的相位进行分布式调制。两个多级微反射镜的区别在于它们具

有不同的阶梯排布方式与阶梯步长,设两个多级微反射镜的阶梯宽度均为 a ,对于阶梯沿 x 轴方向排布的横向多级微反射镜,其阶梯步长为 d ,则相邻阶梯引入的相位调制量为 $4\pi\nu d$;而对于阶梯沿 y 轴方向排布的纵向多级微反射镜,其阶梯步长变为 Nd ,则相邻阶梯引入的相位调制量为 $4\pi\nu Nd$ 。由此,横向多级微反射镜和纵向多级微反射镜的屏函数可分别表示为

$$s_1(x, y) = \left[\text{rect}\left(\frac{x - a/2}{a}\right) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu m d) \delta(x - ma) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right), \quad (4)$$

$$s_2(x, y) = \left[\text{rect}\left(\frac{y - a/2}{a}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu n Nd) \delta(y - na) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right), \quad (5)$$

式中 $*$ 表示卷积运算, $\text{rec}(\cdot)$ 为矩形函数, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。

已知多级微反射镜的屏函数,则入射光场经横向多级微反射镜调制后的出射光场为 $u_0(x, y)s_1(x, y)$, 经纵向多级微反射镜调制后的出射光场为 $u_0(x, y)s_2(x, y)$ 。根据标量衍射理论,设光场由多级微反射镜到微透镜阵列的传播距离为 z ,因此被两个多级微反射镜调制的光场传播到微透镜阵列上发生干涉时的叠加光场可以表示为

$$u_1(x, y) = \text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_0(x, y)s_1(x, y) + u_0(x, y)s_2(x, y)]H_z(f_x, f_y)\}, \quad (6)$$

式中 FT 表示傅里叶变换, FT^{-1} 表示傅里叶逆变换, f_x 和 f_y 为空间频率, $H_z(f_x, f_y) = \exp(j2\pi\nu z) \exp[-j\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)]$ 为 Fresnel 传递函数^[10]。

微透镜阵列对干涉光场进行同步接收,假设各个微透镜单元的尺寸均为 a ,各个微透镜单元的焦距均为 f ,由于单个微透镜单元对光场引入的相位调制因子为 $\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2)\right]$,因此微透镜阵列的屏函数可以表示为

$$t(x, y) = \left\{ \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2)\right] \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{a}\right) \right\} * \left[\frac{1}{a^2} \text{comb}\left(\frac{x - a/2}{a}\right) \text{comb}\left(\frac{y - a/2}{a}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right), \quad (7)$$

式中 $\text{comb}(\cdot)$ 为梳状函数。

干涉光场经过微透镜阵列透射后,其透射光场变为 $u_2(x, y) = u_1(x, y)t(x, y)$,在微透镜阵列焦平面上形成干涉图像。根据标量衍射理论,微透镜阵列焦平面上干涉图像的强度分布可以表示为

$$I(x, y) = |\text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_2(x, y)]H_f(f_x, f_y)\}|^2 = |\text{FT}^{-1}\{\text{FT}[u_0(x, y)s_1(x, y) + u_0(x, y)s_2(x, y)]H_z(f_x, f_y) * T(f_x, f_y)H_f(f_x, f_y)\}|^2, \quad (8)$$

式中 $H_f(f_x, f_y) = \exp(j2\pi\nu f) \exp[-j\pi\lambda f(f_x^2 + f_y^2)]$, $T(f_x, f_y) = \text{FT}[t(x, y)]$ 是微透镜阵列的空间频谱,通过数学分析与计算后可知函数形式为

$$T(f_x, f_y) = -j\lambda f N^2 a^4 \{ \exp[j\pi\lambda f(f_x^2 + f_y^2)] * [\text{sinc}(af_x) \text{sinc}(af_y)] \} \cdot \{ \text{comb}(af_x) \text{comb}(af_y) \exp[-j\pi a(f_x + f_y)] \} * [\text{sinc}(Naf_x) \text{sinc}(Naf_y)]. \quad (9)$$

将(3)~(5)式和(9)式代入(8)式,便可以得到微透镜阵列焦平面上干涉图像的强度分布。干涉图像实质上是对应各个干涉级次的干涉像点阵列,将干涉像点阵列与光程差相匹配后,得到干涉图阵列 $I(m, n)$,将其代入(2)式,便可得到入射光波的复原

光谱。

3.2 干涉图像与复原光谱的数值计算

波前像差可以分为轴向像差和垂轴像差,其中对波前畸变影响比较大的是初级像差,因此本研究主要以初级轴向球差和初级垂轴彗差为例分析波前

像差对干涉图像和复原光谱的影响。取光学准直系统的出瞳直径 $D = 48 \text{ mm}$, 多级微反射镜的级数 $N = 32$, 阶梯高度 $d = 0.625 \text{ }\mu\text{m}$, 阶梯宽度 $a = 1 \text{ mm}$, 传播距离 $z = 32 \text{ mm}$, 微透镜焦距 $f = 16 \text{ mm}$, 令入射光为单色波, 即入射光光谱 $B_0(\nu) = \delta(\nu - \nu_0)$, 波数 $\nu_0 = 0.3 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$, 根据(8)式, 当波前像差为 0 时接收面上得到的干涉像点阵列的光强分布如图 2(a)所示; 当波前像差的球差量和彗差量的均方根均为 0.2λ (λ 为波长)时, 接收面上得到的干涉像点阵列的光强分布分别如图 2(b)和图 2(c)所示。

为了便于观察和对比, 图 2 只给出了干涉图像中四分之一区域的干涉像点阵列的光强分布情况。由于衍射效应与波前像差的影响, 各级次干涉像点的能量向周围发生弥散, 形成弥散斑。通过对比可

以看出, 波前像差导致干涉图像中各干涉像点的相对强度发生了改变。图 2(a)为无像差时对应的干涉像点阵列的光强分布, 其归一化峰值强度均在 0.9 以上, 而当系统存在球差时, 如图 2(b)所示, 许多干涉像点(如图 2(b)中的第(4,4)个干涉像点)的归一化峰值强度下降到 0.7; 而当系统存在彗差时, 如图 2(c)所示, 许多干涉像点(如图 2(c)中的第(4,15)个干涉像点)的归一化峰值强度下降到 0.8。因此有像差的干涉像点的峰值强度相对于无像差的干涉像点的峰值强度产生了不同程度的衰减, 且不同级次的干涉像点的峰值强度具有不同的衰减量。虽然球差和彗差所对应的干涉像点的空间分布看起来差别不大, 但各干涉像点的峰值强度有着明显的差别。因此, 干涉像点的强度受到了波前像差的调制。

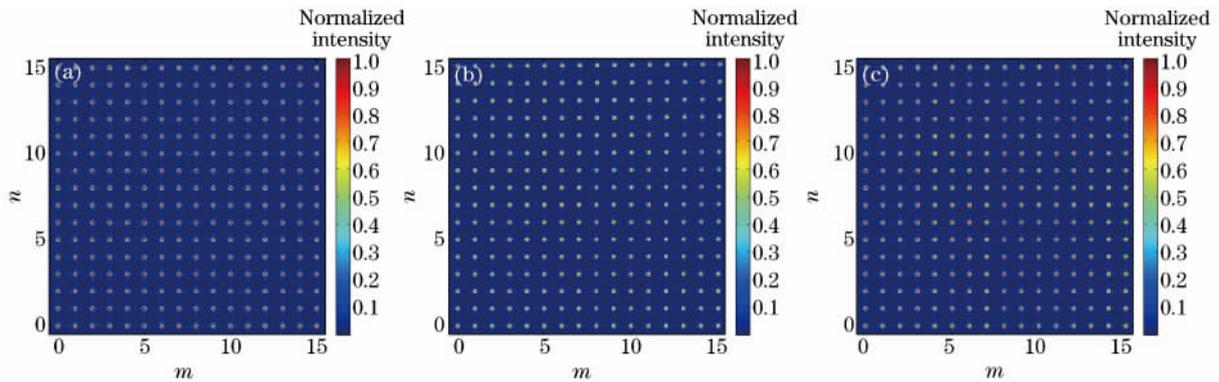


图 2 不同波前像差对应的干涉像点阵列的光强分布。(a)无像差;(b)球差;(c)彗差

Fig. 2 Light intensity of interferogram image point arrays with different aberrations.

(a) Aberration-free; (b) spherical aberration; (c) coma

将干涉像点阵列与光程差阵列相匹配, 根据(2)式滤除其直流分量, 并对其进行离散傅里叶变换^[11-13], 便可以由干涉图像复原出入射光信号的光谱, 如图 3 所示。

图 3(a)和图 3(b)分别是由均方根为 0.2λ 的球差和彗差对应的干涉像点阵列图 2(b)和图 2(c)变换后得到的复原光谱。相对于理想的单色谱

线, 球差和彗差使得复原光谱在低频光谱区域出现了低频谱线。低频谱线由基频及其高次谐波组成, 基频位于 $0.25 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$ 处, 高次谐波为基频的整数倍, 且频次越高, 幅值越弱。同时, 球差和彗差所对应的低频谱线的幅频特性也具有不同的形式和数值。比较图 3(a)和图 3(b)可以看出, 对于相同均方根值的球差和彗差, 球差在复原光谱中引

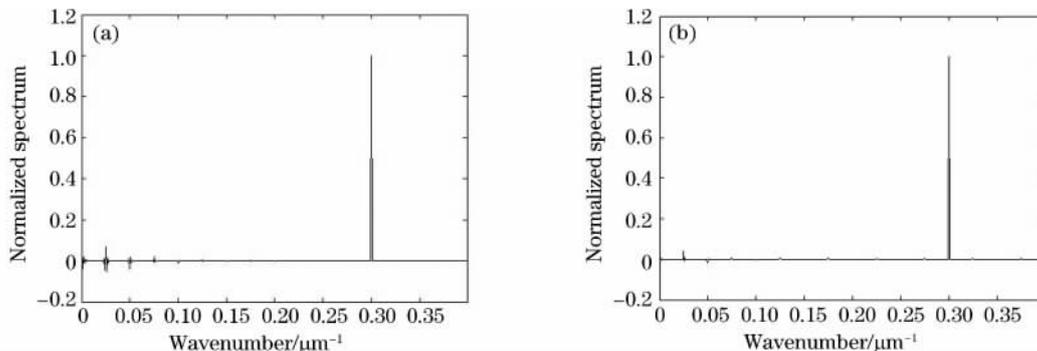


图 3 不同像差对应的复原光谱。(a)球差;(b)彗差

Fig. 3 Recovered spectra with different aberrations. (a) Spherical aberration; (b) coma

入的噪声量要远大于彗差在复原光谱中引入的噪声量。

4 结果分析与光谱修正

4.1 干涉像点强度调制分析

根据图 2,波前像差与衍射效应使得干涉图像中的各干涉像点不再是一个理想的几何像点,而是一个弥散斑,其峰值强度发生衰减。用斯特列尔比(Strehl ratio)来表示波前像差对干涉像点峰值强度的调制作用,即波前像差导致的弥散像斑的峰值强度与无像差时理想像斑的峰值强度之比。波前像差函数为 $W(x, y)$, 则第 (m, n) 个干涉光场单元所对应的子波前的像差函数可以表示为 $W_{m,n}(x, y) = W(x, y) \text{rect}\left(\frac{x-a/2-ma}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-a/2-na}{a}\right)$, 从而第 (m, n) 个干涉像点所对应的斯特列尔比可表达为

$$R_{m,n}(\Delta) \approx \exp[-(2\pi\nu\sigma_{W_{m,n}})^2], \quad (10)$$

式中 $\sigma_{W_{m,n}}$ 为第 (m, n) 个干涉光场单元所对应的子波前像差的标准差。

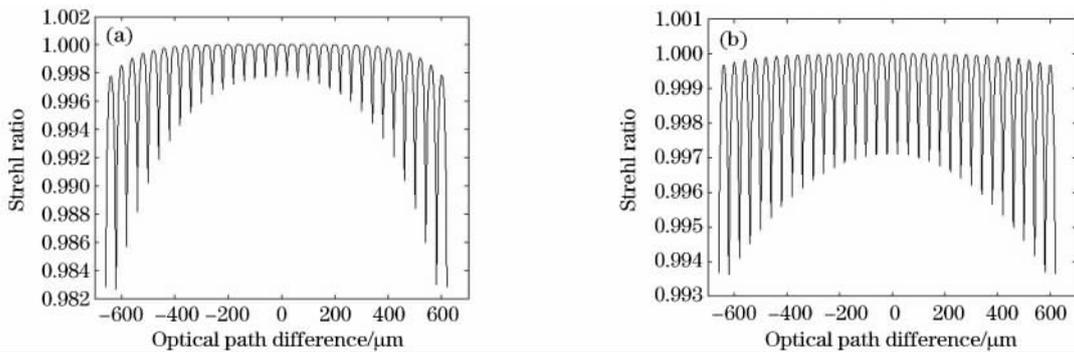


图 4 不同像差对应的斯特列尔比调制曲线。(a)球差;(b)彗差

Fig. 4 Strehl ratio modulation curves for different aberrations. (a) Spherical aberration; (b)coma

4.2 附加相位误差分析

由于波前像差的影响,各级次干涉光场单元所对应的子波前的传播方向不再平行于光轴。由第 (m, n) 个干涉光场单元所对应的子波前的像差函数 $W_{m,n}(x, y)$ 可以得到该子波前的法线相对于光轴的偏向角,即第 (m, n) 个干涉光场单元的传播方向相对于光轴的偏向角为

$$\theta_{m,n} = \arccos \sqrt{1 - \left(\frac{\partial W_{m,n}}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial W_{m,n}}{\partial y}\right)^2}. \quad (11)$$

由于各干涉光场单元的传播方向相对于光轴产生了一定的偏向角,因此多级微反射镜在对干涉图像进行采样时,各干涉级次的采样光程差将会受到光场偏向角的影响。当第 (m, n) 个干涉光场单元以偏向

干涉像点的斯特列尔比代表了波前像差对各干涉像点的调制度,当波前像场的球差量和彗差量的均方根分别为 0.2λ 时,波前像差对各级次干涉像点的斯特列尔比调制曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,随着采样光程差的连续变化,球差和彗差使干涉像点的调制度呈准周期振荡变化,振荡周期为 $40 \mu\text{m}$ 。在零光程差处干涉像点的调制度为 1,说明球差和彗差对零光程差处的干涉像点没有影响;而干涉像点的调制度随光程差增加呈振荡变化,说明球差和彗差对非零光程差区域干涉像点的峰值强度进行了不同程度的削减。球差和彗差对应的调制曲线之间的差异主要表现为上包络线和下包络线之间的差异,这说明了不同形式的像差对干涉像点调制影响的差异。对比图 4(a)和图 4(b)可知,对于相同均方根值的球差和彗差,球差对干涉像点峰值强度的影响要远大于彗差对干涉像点峰值强度的影响。而振荡周期之所以为 $40 \mu\text{m}$ 主要是因为球差和彗差具有对称性,而光程差阵列的一个周期正好为 $0.625 \mu\text{m} \times 2 \times 32 = 40 \mu\text{m}$ 。

角 $\theta_{m,n}$ 入射到多级微反射镜上时,第 (m, n) 个采样光程差由理想的 $\Delta_{m,n}$ 变为 $\Delta'_{m,n} = \Delta_{m,n} \cos \theta_{m,n}$,从而产生了一个附加相位误差,即

$$\varphi_{m,n}(\Delta) = 2\pi\nu(\Delta - \Delta \cos \theta_{m,n}) = 2\pi\nu\Delta \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\partial W_{m,n}}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial W_{m,n}}{\partial y}\right)^2} \right]. \quad (12)$$

根据附加相位误差公式,当波前像差的球差量和彗差量的均方根分别为 0.2λ 时,附加相位误差随光程差的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出,球差和彗差使得附加相位误差随光程差的增加呈准周期振荡变化,且振荡周期也为 $40 \mu\text{m}$,但是振荡的幅值都随着绝对光程差的增加而增大。振荡幅值的变化说明波前像差对不同级次的干

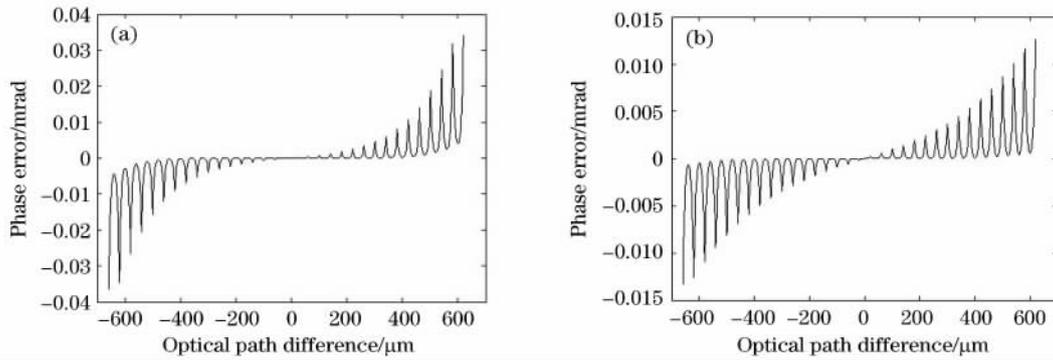


图 5 不同像差对应的相位误差随光程差的变化曲线。(a)球差;(b)彗差

Fig. 5 Phase error vs. optical path difference with different aberrations. (a) Spherical aberration; (b) coma

涉像点引入了不同大小的相位误差量。球差和彗差对应的相位误差曲线的外包络线和内包络线之间的差异说明了不同形式的像差对干涉图像影响的差异。对于相同均方根值的球差和彗差,球差引入的相位误差量要远大于彗差引入的相位误差量。

4.3 复原光谱谱线噪声分析

由 4.1 节和 4.2 节的分析可知,波前像差对干涉图像中各级次干涉像点的光强进行了调制,并且引入相位误差,从而导致复原光谱的失真。由图 5 可知,均方根为 0.2λ 的球差和彗差引入的相位误差量较小,忽略相位误差对干涉光强的影响,则实际的干涉光强可以近似表示为

$$I(\Delta) \approx R(\Delta) \int_0^\infty B_0(\nu) d\nu + R(\Delta) \int_0^\infty B_0(\nu) \exp[j(2\pi\nu\Delta)] d\nu = R(\Delta) \langle I(\Delta)/R(\Delta) \rangle + R(\Delta) I_0(\Delta), \quad (13)$$

式中 $\langle I(\Delta)/R(\Delta) \rangle$ 为 $I(\Delta)/R(\Delta)$ 的平均值。

对(13)式的两边同时做傅里叶变换运算,则由实际的干涉图像得到的复原光谱函数为

$$B(\nu) = \langle I(\Delta)/R(\Delta) \rangle M(\nu) + M(\nu) * B_0(\nu), \quad (14)$$

式中 $M(\nu) = \text{FT}[R(\Delta)]$ 为斯特列尔比的傅里叶谱。

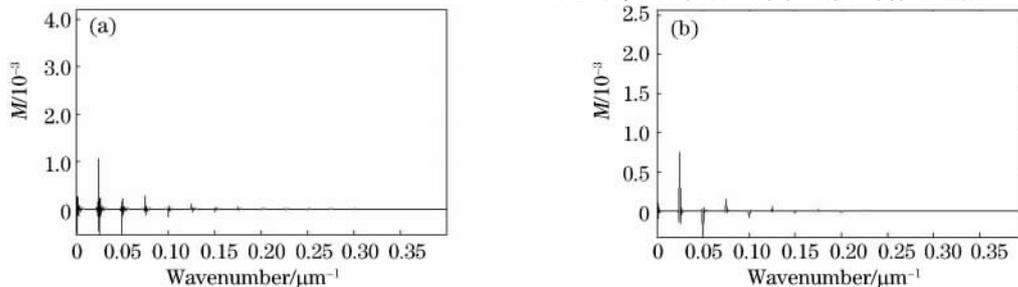


图 6 不同像差对应的斯特列尔比的傅里叶谱。(a)球差;(b)彗差

Fig. 6 Fourier spectra of Strehl ratio with different aberrations. (a) Spherical aberration; (b) coma

由(14)式可以看出,波前像差在空间域对各级次干涉像点的光强进行调制,在频域则表现为斯特列尔比的傅里叶谱与入射光谱的相互作用,也就是说波前像差使复原光谱除了具有入射光波的光谱成分之外,还叠加有斯特列尔比的傅里叶谱成分。对于均方根为 0.2λ 的球差和彗差,由斯特列尔比调制曲线可以得到斯特列尔比的傅里叶谱,其基频及谐频的放大图如图 6 所示。

由图 6 可以看出,球差和彗差的斯特列尔比傅里叶谱由基频及其高次谐频组成,基频位于 $0.025 \mu\text{m}^{-1}$ 处,高次谐频为基频的整数倍。斯特列尔比调制曲线的振荡周期为 $40 \mu\text{m}$,因此其傅里叶谱的基频为 $0.025 \mu\text{m}^{-1}$ 。通过对比图 6 与图 3 可以看出,在图 3 中受波前像差影响的复原光谱中的低频谱线噪声含有斯特列尔比的傅里叶谱成分,因此斯特列尔比的傅里叶谱是复原光谱中低频谱线噪声出现的主要原因。

4.4 复原光谱的光谱修正

干涉光强受到波前像差斯特列尔比的调制,因此利用波前像差的斯特列尔比对干涉光强进行修正,可以降低波前像差对复原光谱的影响。由实际光学准直系统的波前像差函数 $W(x, y)$ 可以得到与各干涉光场单元所对应的子波前的像差函数 $W_{m,n}(x, y)$,进

而得到各级次干涉像点所对应的斯特列尔比 $R_{m,n}(\Delta)$ 。由实际得到的各级次干涉像点的光强 $I(\Delta)$ 与其所对应的斯特列尔比 $R(\Delta)$, 根据(13)式, 就可以得到斯特列尔比修正的干涉图函数。通过对斯特列尔比修正的干涉图函数进行傅里叶变换, 便可以得到斯特列尔比修正后的复原光谱函数 $B'_0(\nu)$, 即

$$B'_0(\nu) = \text{FT} \left[\frac{I(\Delta) - \langle I(\Delta)/R(\Delta) \rangle R(\Delta)}{R(\Delta)} \right]. \quad (15)$$

根据(15)式, 当波前像差的球差量和彗差量的均方根分别为 0.2λ 时, 利用波前像差的斯特列尔比对干涉光强进行修正后得到的复原光谱如图 7 所示。

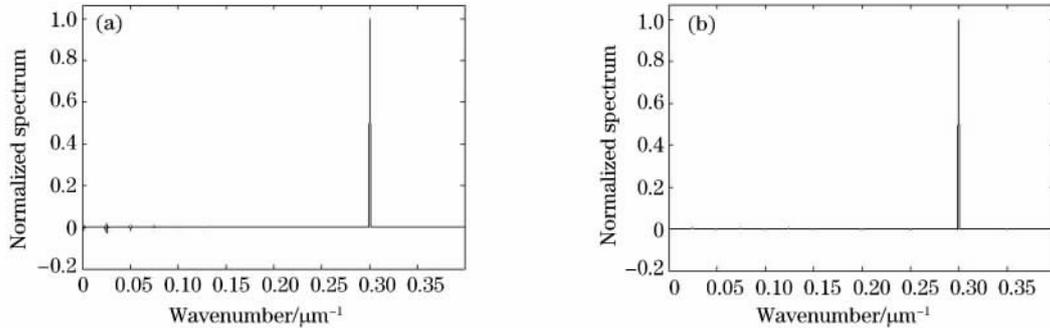


图 7 斯特列尔比修正后的复原光谱。(a)球差斯特列尔比修正;(b)彗差斯特列尔比修正

Fig. 7 Recovered spectra after Strehl ratio correction. (a) Spherical aberration Strehl ratio correction; (b) coma Strehl ratio correction

图 7(a)和图 7(b)分别为利用球差斯特列尔比对图 2(b)的干涉像点阵列进行修正和利用彗差斯特列尔比对图 2(c)的干涉像点阵列进行修正后得到的复原光谱。通过比较图 7 和图 3 可以看出, 利用斯特列尔比修正得到的复原光谱中, 低频谱线噪声得到了有效的抑制。虽然利用球差斯特列尔比修正得到的复原光谱中仍存有少量的残余低频噪声(主要是相邻干涉光场单元之间的串扰引起的), 但与斯特列尔比修正前的复原光谱相比, 修正后的复原光谱质量已经得到了明显改善。因此, 在一定的像差容限范围内, 利用波前像差的斯特列尔比对干涉光强进行修正, 可以有效降低波前像差引起的复原光谱的失真。

为了对斯特列尔比修正前和修正后的复原光谱的质量进行对比, 并提出合理的像差容限, 采用归一

化光谱误差来评价复原光谱的质量, 即 $Q = \int_0^\infty |B(\nu) - B_0(\nu)| d\nu / \left[\int_0^\infty B_0(\nu) d\nu \right]$ 。针对不同的球差量与彗差量, 求取利用斯特列尔比对干涉图像进行修正前与修正后复原光谱的归一化光谱误差, 得到归一化光谱误差随球差均方根 σ_{w_s} 与彗差均方根 σ_{w_c} 的变化情况, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出: 利用斯特列尔比对干涉图像修正前, 复原光谱的归一化光谱误差随 σ_{w_s} 和 σ_{w_c} 呈准线性增加, 当仅存在球差时, Q 随 σ_{w_s} 的递增速率约为 $3.27\lambda^{-1}$; 当仅存在彗差时, Q 随 σ_{w_c} 的递增速率约为 $1.18\lambda^{-1}$, 可见球差对复原光谱的影响要大于彗差对复原光谱的影响。当 $\sigma_{w_s} = 0.2\lambda$ 、 $\sigma_{w_c} = 0.2\lambda$ 时, 归一化光谱误差已经达到 0.9, 复原光谱中的噪声功率已接近信号功率。而当利用斯特列尔比对干涉图像

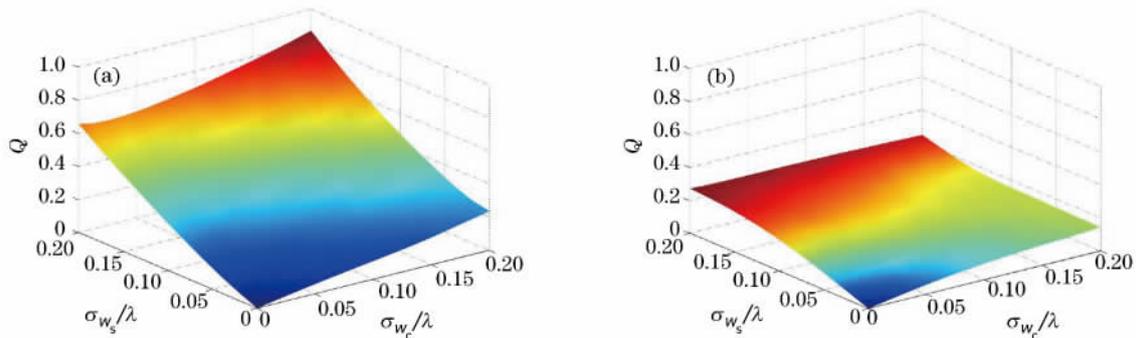


图 8 归一化光谱误差随像差均方根的变化曲面。(a)斯特列尔比修正前;(b)斯特列尔比修正后

Fig. 8 Normalized spectra error varying with aberration root-mean-square value. (a) Before Strehl ratio correction; (b) after Strehl ratio correction

进行修正后,其复原光谱的 Q 值明显降低,当 $\sigma_{w_s} = 0.2\lambda$ 、 $\sigma_{w_c} = 0.2\lambda$ 时, Q 值已经下降到 0.27,与斯特列尔比校正前的复原光谱相比,光谱质量提升了 2 倍多。因此,利用斯特列尔比对干涉图像进行修正,可以有效降低波前像差对复原光谱的影响。由图 8(b) 可知,若采用斯特列尔比修正的方法,将复原光谱的归一化光谱误差控制在 5% 以内,则系统的波前像差只需要控制在 $\sigma_{w_s} \leq 0.025\lambda$ 、 $\sigma_{w_c} \leq 0.04\lambda$ 即可。

5 结 论

在基于多级微反射镜的傅里叶变换光谱仪结构的基础上,利用多级微反射镜对入射光场进行空间相位调制的同时,引入微透镜阵列取代缩束系统对各级次的干涉光强进行同步接收,可以有效减小仪器的体积和重量,实现光谱仪器的微型化。由于光学准直系统波前像差的影响,入射光场的波前会产生畸变,从而引起干涉图像与复原光谱的失真。系统波前像差使得各干涉光场单元所对应的子波面具有不同的子波前像差,各子波前像差会对其所对应的干涉像点的强度进行调制,从而导致干涉像点峰值强度的衰减。同时,波前像差还会导致各干涉光场单元所对应的子波面的法线偏离光轴,从而使采样光程差发生改变,进而引入附加相位误差。波前像差在空域对干涉图像中各干涉像点光强进行调制,在频域中则引起复原光谱中低频谱线噪声的产生。低频谱线噪声是波前像差对干涉像点进行调制的结果,因此可以利用斯特列尔比对波前像差作用的干涉图像进行修正,以降低波前像差对干涉图像的影响,进而有效降低波前像差导致的复原光谱的失真,提高复原光谱的质量。

参 考 文 献

- [1] Weng S F. Fourier transform infrared spectrometer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 34-56.
翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 34-56.
- [2] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry[M]. New Jersey: John Wiley and Sons Publication, 2007: 19-41.
- [3] Manzardo O. Micro-sized Fourier spectrometers[D]. Neuchatel: University of Neuchatel Institute of Microtechnique, 2002: 29-54.
- [4] Manuilskiy A, Andersson H, Tungstrom G, *et al.* Compact multi channel optical Fourier spectrometer [C]. SPIE, 2006, 6395: 639504.
- [5] Liang J Q, Liang Z Z, Lü J G, *et al.* Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer [J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 277-296.
梁静秋, 梁中翥, 吕金光, 等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 277-296.
- [6] Fu J G, Liang J Q, Liang Z Z. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222006.
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222006.
- [7] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Analysis and restraint of alignment error by stepped micro-mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0330003.
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 多级微反射镜对准误差的分析与抑制[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0330003.
- [8] Feng C, Wang B, Liang Z Z, *et al.* Miniaturization of step mirrors in a static Fourier transform spectrometer: Theory and simulation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(1): 128-133.
- [9] Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Optical field analysis and diffraction restraint of microminiature Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1130002.
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 微型傅里叶变换光谱仪光场分析与衍射抑制[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1130002.
- [10] Lü N G. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 89-90.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 89-90.
- [11] Feng C, Liang J Q, Liang Z Z. Spectrum constructing with nonuniform sample using least-squares approximation by cosine polynomials [J]. Applied Optics, 2011, 50(34): 6377-6383.
- [12] Feng Y T, Sun J, Li Y, *et al.* Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 48-55.
冯玉涛, 孙剑, 李勇, 等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 48-55.
- [13] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, *et al.* The polarization difference interference imaging spectrometer — I. concept, principle, and operation [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 110704.
穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 I. 概念原理与操作[J]. 物理学报, 2014, 63(11): 110704.