

基于多级微镜的傅里叶变换成像光谱仪干涉成像系统分析与设计

吕金光¹, 梁静秋¹, 梁中翥^{1*}, 田超^{1,2}, 秦余欣¹

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 为了实现傅里叶变换成像光谱仪的静态化与高通量, 提出一种基于多级微镜的时空混合调制成像光谱仪, 其干涉系统是利用一个多级微镜代替迈克尔逊干涉仪中的平面镜, 其显著特点是无运动部件和限制系统光通量的狭缝, 可同时获得目标的干涉图与二维空间图像。该成像光谱仪利用前置成像系统将目标成像到干涉系统的平面镜与多级微镜上, 利用多级微镜的结构特点对两成像光束的光程差进行调制, 然后通过后置成像系统获得不同干涉级次的目标图像。首先通过对该成像光谱仪干涉系统光谱信噪比的分析, 明确了光谱信噪比与图像信噪比之间的关系, 确定了多级微镜的特征参数。为了确保每个阶梯面所对应光程差的恒定性, 通过对前置成像系统成像过程的分析, 确定了前置成像系统像方远心的光路结构; 通过对系统视场角与光程差之间关系的分析和计算, 确定了前置成像系统的设计指标并完成了光学设计。为了保证后置成像系统不引入额外的光程差, 通过对后置成像系统成像特点的分析, 确定了后置成像系统双远心的光路结构; 通过对系统入射孔径角与阶梯级数之间关系的分析和计算, 最终设计出满足系统性能需求的后置成像系统。通过对各单元系统的理论分析与光学设计, 为静态化与高通量成像光谱仪的发展提供了一种新的思路。

关键词 成像光谱仪; 时空混合调制; 傅里叶变换; 干涉成像; 光谱信噪比

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)05-1554-06

引言

成像光谱技术作为成像技术与光谱技术的结合, 既可以获取目标的图像信息, 又可从获得的光谱图像数据中得出物质的光谱特征, 进而揭示目标的光谱特性、存在状况以及物质成份, 因而在气象、资源、环境、生态等领域得到了广泛的应用^[1]。傅里叶变换成像光谱仪是一种新型的基于干涉调制原理的成像光谱仪, 按照其干涉图调制方式的不同, 可以分为时间调制型、空间调制型和时空混合调制型。国内外对于时间调制傅里叶变换成像光谱仪的研究开展的最早, 其主要通过动镜扫描对图像的不同干涉级次进行时间调制, 经过一个扫描周期之后, 每一个像素就可以获得一个完整的光谱。时间调制成像光谱仪由于需要一套高精度的动镜驱动系统, 对机械扫描精度要求也高, 降低了仪器的稳定性和可靠性, 进而人们便开始开展空间调制傅里叶变换成像光谱仪的

研究。空间调制成像光谱仪中目标的狭缝像在与狭缝像垂直的方向上展开为各个干涉级次的干涉图, 从而每一行与狭缝垂直方向的像素就可以获得狭缝上每一点的光谱信息。空间调制成像光谱仪由于需要一个约束目标空间分辨率的狭缝, 限制了系统的光通量, 降低了系统的信噪比, 因此时空混合调制傅里叶变换成像光谱仪目前正成为国内外研究的热点^[2-7]。时空混合调制成像光谱仪在探测器平面上获得的是受到干涉光强信号调制的目标的二维全景图像, 由于取消了时间调制成像光谱仪中的动镜驱动系统, 回避了空间调制成像光谱仪中的狭缝, 因此具有稳定性好、可靠性强、光通量大、信噪比高等优点^[8-9]。基于此, 本文提出了一种基于多级微镜的时空混合调制傅里叶变换成像光谱仪结构, 其干涉系统是利用多级微镜对两成像光束的光程差进行调制, 而光学系统则是采用两次成像过程。本文主要对该成像光谱仪的干涉系统、前置和后置成像系统进行分析与设计, 进而明确系统设计方法, 获得系统设计参数。

收稿日期: 2014-08-17, 修订日期: 2014-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61027010, 60977062, 61376122), 国家高技术研究发展计划项目(2009AA04Z315), 吉林省科技发展计划项目(201205025, 20130206010GX), 长春市科技计划项目(2011131, 2013261)和应用光学国家重点实验室自主基金项目资助

作者简介: 吕金光, 1984年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员 e-mail: jinguanglv@163.com

*通讯联系人 e-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

1 仪器工作原理

基于多级微镜的傅里叶变换成像光谱仪由前置成像系统、干涉系统和后置成像系统组成，如图 1 所示，其中分束器、平面镜和多级微镜构成干涉系统。来自地物目标的入射光束经前置成像系统在其像方焦面上进行成像，分束器将成像光束分为强度相等的两束光，一束光透过分束器成像到平面镜上，另一束光被分束器反射后成像到多级微镜上。它们作为两个相干物点，其出射光束分别被平面镜和多级微镜反射后在分束器上相遇，经过后置成像系统，成像于探测器上并发生干涉。多级微镜的结构引起两个一次像点之间的光程差变化，再次成像干涉后，干涉像点携带有一定的位相差信息。来自不同视场的光束，成像在多级微镜的不同阶梯上，而不同的阶梯引起不同的光程差变化，从而导致不同视场的干涉像点具有不同的干涉级次。因此，探测器像面上沿阶梯方向形成同一干涉级次的干涉像点，垂直于阶梯方向形成不同干涉级次干涉像点。将成像光谱仪沿垂直于阶梯方向做推扫，每次步进一个阶梯宽度，每次步进记录一帧干涉图像，便得到干涉图像的三维数据立方体，如图 2 所示。

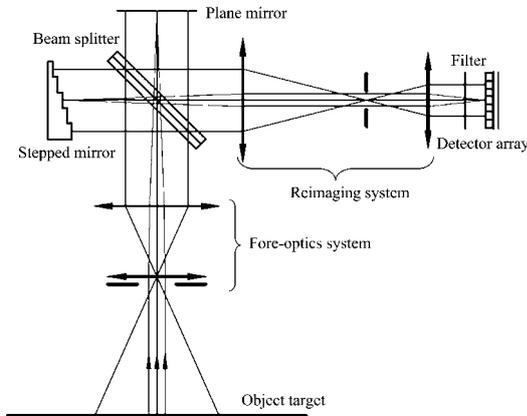


图 1 基于多级微镜的傅里叶变换成像光谱仪光路示意图
Fig 1 Schematic of Fourier transform imaging spectrometer based on multi-micro-mirror

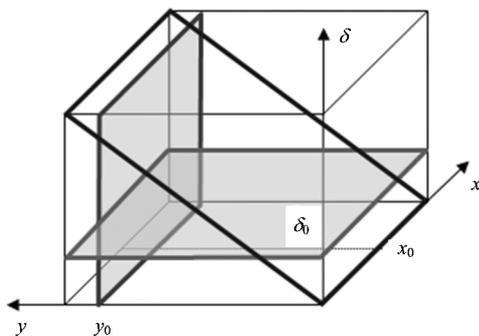


图 2 干涉图像三维数据立方体
Fig 2 Three-dimensional data cube of interferogram image

将每一帧干涉图像(图 2 中的 $\delta=k_y$ 平面)剪切为不同干

涉级次的图像单元，使其成为对应各个特定光程差的图像单元。干涉图像完成剪切之后，需要对其进行图像拼接与光谱拼接。将同一干涉级次的图像单元按照时间顺序进行拼接，便可以获得一幅全景图像，即图 2 中的 $\delta=\delta_0$ 平面；将同一目标的干涉图像单元按照光程差的顺序进行拼接，便可以获得同一目标物点不同级次的干涉图阵列，即图 2 中的 $y=y_0$ 平面，对其做傅里叶变换可以得到这一物点的光谱信息。

2 干涉系统光谱信噪比分析

干涉系统中的核心器件是多级微镜，多级微镜的作用在空间域表现为对入射光场进行能量分割，在频率域则表现为对干涉图进行离散采样。设多级微镜阵列的阶梯步长为 d ，阶梯级数为 N ，则干涉图像的采样间隔为 $\Delta=2d$ 。为了避免在对干涉图像进行离散采样之后进行原始光谱的重构时发生光谱混叠，阶梯步长 d 必须遵循 Nyquist-Shannon 采样定理。

设多级微镜阵列的阶梯序数为 n ，则多级微镜第 n 个阶梯所对应的光程差为

$$\delta(n) = 2nd \tag{1}$$

因此，干涉光场在横向空间就被多级微镜分割成了 N 个光场单元，对应 N 个光程差采样序列。由傅里叶变换光谱学原理，干涉图像三维数据立方体为

$$I[x, y, \delta(n)] = \int_0^\infty B(x, y, \nu) \exp[j2\pi\nu\delta(n)] d\nu \tag{2}$$

式中 $\nu=1/\lambda$ 为光信号的空间频率， $B(x, y, \nu)$ 为坐标 (x, y) 处目标物点的光谱。

对干涉图像数据立方体进行图像剪切与光谱拼接处理后，得到 $y=y_0$ 平面上的干涉图像采样序列 $I[x, y_0, \delta(n)]$ ，将其记为 $I(x, n)$ 。对其沿光程差方向进行离散傅里叶变换运算，就可以反演出 $y=y_0$ 平面上各目标物点频域的光谱信息^[10]，即

$$B(x, \nu) = 2d \sum_{n=0}^{N-1} I(x, n) \exp(-j2\pi\nu n2d) \tag{3}$$

根据随机信号统计理论，光谱仪系统中干涉图像噪声的均方功率可以表示为 $\sigma_e^2 = \langle e(\delta)e^*(\delta) \rangle$ ，光谱噪声的均方功率可以表示为 $\sigma_E^2 = \langle E(\nu)E^*(\nu) \rangle$ 。其中 $e(\delta)$ 为干涉图像噪声， $E(\nu)$ 为干涉图像噪声的傅里叶谱。

由此，光谱噪声的均方功率为如下形式

$$\sigma_E^2 = \langle E(\nu)E^*(\nu) \rangle = \frac{1}{\nu_f} \int_0^\infty E(\nu)E^*(\nu) d\nu \tag{4}$$

式中 ν_f 为采样干涉图像的折叠频率。

根据 Parseval 定理，噪声在空间域内的总能量等于其在频率域内的总能量，所以干涉图像噪声的总功率等于光谱噪声的总功率，即

$$\int_0^\infty E(\nu)E^*(\nu) d\nu = \int_0^\infty e(\delta)e^*(\delta) d\delta \tag{5}$$

由系统工作原理可知，多级微镜对干涉图像进行离散采样的同时，也对干涉图像噪声进行离散采样，因此光谱噪声的均方功率可以表示为

$$\sigma_E^2 = \frac{1}{\nu_f} \int_0^\infty e(\delta)e^*(\delta) d\delta = \frac{1}{\nu_f} \sum_{n=0}^{N-1} e(n)e^*(n)\Delta \tag{6}$$

式中 $e(n)$ 为干涉图像噪声 $e(\delta)$ 的采样序列。

由多级微镜采样后的干涉图像噪声的均方功率可以表示为

$$\sigma_e^2 = \langle e(\delta)e^*(\delta) \rangle = \langle e(n)e^*(n) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e(n)e^*(n) \quad (7)$$

所以由干涉图像噪声的均方功率，光谱噪声的均方功率可以表示为

$$\sigma_E^2 = \frac{N\Delta}{\nu_f} \sigma_e^2 \quad (8)$$

由于折叠频率 $\nu_f = \frac{1}{2\Delta}$ ，则光谱噪声的均方功率为

$$\sigma_E^2 = 2N\Delta^2 \sigma_e^2 \quad (9)$$

同时，对于干涉图像，其所对应的光谱的平均功率为

$$B_{ave} = \frac{1}{BW} \int_0^\infty B(\nu) d\nu = \frac{I_0}{BW} \quad (10)$$

式中 BW 为干涉图像对应的光谱带宽， I_0 为零光程差处干涉图像的强度。

因此，干涉系统的光谱信噪比可以表示为

$$SNR_{Spectrum} = \frac{B_{ave}}{\sigma_E} = \frac{I_0}{\sqrt{2N\Delta} BW \sigma_e} \quad (11)$$

由于 $\frac{I_0}{\sigma_e} = SNR_{Image}$ 为系统的图像信噪比，所以系统的光谱信噪比为

$$SNR_{Spectrum} = \frac{1}{\sqrt{2N\Delta} BW} SNR_{Image} \quad (12)$$

由式(12)可以看出，干涉系统的光谱信噪比与系统的图像信噪比成正比，与系统的光谱带宽、多级微镜的采样间隔以及多级微镜阶梯级数的平方根为反比。根据以上分析，为了平衡系统光谱信噪比与系统光谱带宽、光谱分辨率之间的关系，光谱范围取为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ，多级微反射镜的阶梯级数取为 128，多级微反射镜的采样间隔取为 $1.25 \mu\text{m}$ 。

3 前置成像系统分析与设计

前置成像系统将被探目标成像到平面镜上和多级微镜附近，为了保证每一个阶梯面所对应的相干像点具有恒定的光程差，会聚于每一个阶梯上的成像光束的主光线必须垂直于每一个阶梯面。因此，前置成像系统采用像方远心光路结构，令后组透镜的前焦点位于前组透镜上，在前组透镜处放置光阑，从而轴外光束的主光线与光轴平行，与像面垂直，如图 3 所示。

平面镜与第 n 个阶梯镜所对应的成像过程如图 4 所示。从两个相干像点成像过程的实质来看，其中一个像点成像于平面镜上，是一个实像点 A_1 ；而另一个像点则成像于平面镜相对于多级微镜的镜像位置，是一个虚像点 A_2 。因此，虚像面是平面镜实像面关于多级微镜的镜像平面。如果平面镜与多级微镜某一阶梯面之间的距离为 nd ，则实像点 A_1 与虚像点 A_2 之间的距离为 $2nd$ 。

系统采用推扫工作方式，设前置成像物镜的焦距为 f' ，则多级微镜的阶梯宽度为 a ，由于来自不同视场的目标成像

于多级微镜的不同阶梯上，因此不同的视场对应着不同的采样光程差。通过计算，第 n 个光程差所对应的瞬时视场角为

$$\omega(n) \in \left[\arctan\left(\frac{(-N/2+n)a}{f'+nd}\right), \arctan\left(\frac{(-N/2+n+1)a}{f'+nd}\right) \right] \quad (13)$$

光程差与瞬时视场角的关系如图 5 所示。

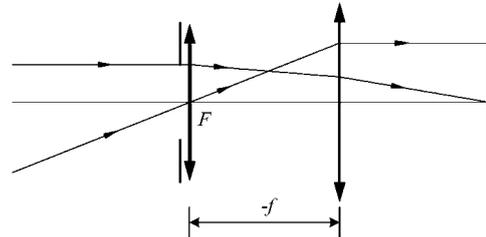


图 3 前置像方远心光路成像系统成像示意图
Fig 3 Structure diagram of fore-optics system with telecentric optical path in image space

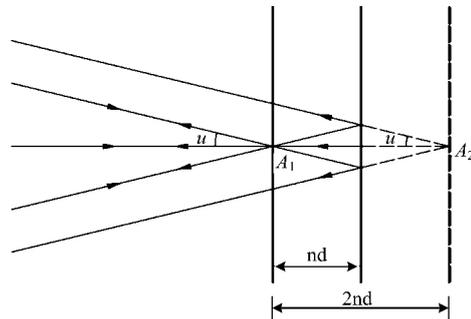


图 4 平面镜与第 n 个阶梯镜所对应的一次成像过程
Fig 4 The first imaging processing corresponding to plane mirror and the n th step mirror

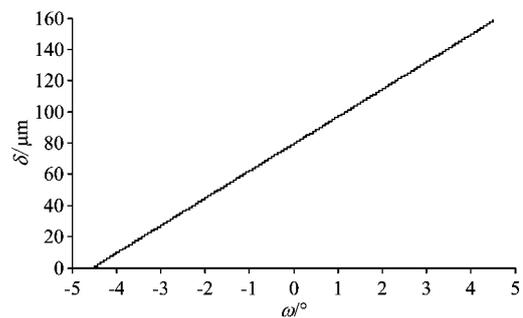


图 5 前置光学系统的视场角与光程差的关系
Fig 5 The relationship between field of view for fore-optics system and optical path difference

根据以上分析对前置成像系统进行设计^[11]，具体设计参数为：光谱范围取 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ，焦距取 200 mm，视场角取 $9.15^\circ \times 9.15^\circ$ (对角线视场角为 12.92°)。图 6 为前置成像系统的光学镜头结构图，图 7 为调制传递函数曲线，调制传递函数曲线显示系统具有良好的成像质量。

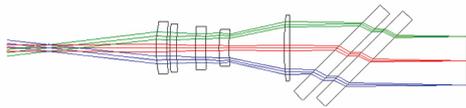


图 6 前置成像系统光学镜头结构图
Fig 6 Layout of fore-optics system

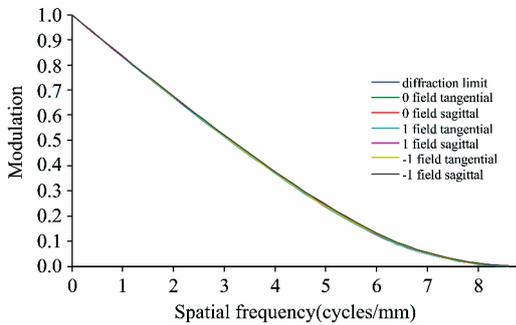


图 7 前置成像系统调制传递函数
Fig 7 MTF curve of fore-optics system

4 后置成像系统分析与设计

后置成像系统将平面镜与多级微镜所对应的两个一次像点再次成像到探测器阵列上, 为了保持光程差的不变性, 入射光束的主光线必须垂直于阶梯平面, 出射光束的主光线必须垂直于探测器面。因此, 后置成像系统采用双远心光路结构, 令前组透镜的后焦点与后组透镜的前焦点相重合, 在焦点重合位置放置光阑, 令平面镜位于前组透镜的前焦面上, 探测器阵列位于后组透镜的后焦面附近, 从而成像光束的主光线平行于光轴, 如图 8 所示。

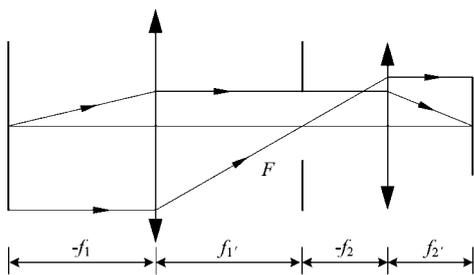


图 8 后置双远心光路成像系统成像示意图
Fig 8 Structure diagram of reimaging system with double telecentric optical path

前置成像系统的两个相干像点 A_1 与 A_2 作为后置成像系统的两个相干物点, 其间距为 $2nd$, 具有相同的入射孔径角 u , 物点 A_1 经过后置成像系统成像于二次像点 A'_1 , 物点 A_2 经过后置成像系统成像于二次像点 A'_2 , 并且两个二次像点具有相同的出射孔径角 u' , 如图 9 所示。设后置成像系统的垂轴放大倍率为 β , 轴向放大率为 α , 则二次像点 A'_1 与 A'_2 之间的距离为 $l = \alpha \times 2nd$ 。由于 $\alpha = \beta^2$, 所以 $l = \alpha \times 2nd = 2nd\beta^2$ 。设后置成像系统的角放大率为 γ , 则两个二次像点的

出射孔径角为 $\tan u' = \gamma \times \tan u$ 。由于 $\gamma = 1/\beta$, 所以 $\tan u' = \gamma \times \tan u = \tan u / \beta$ 。

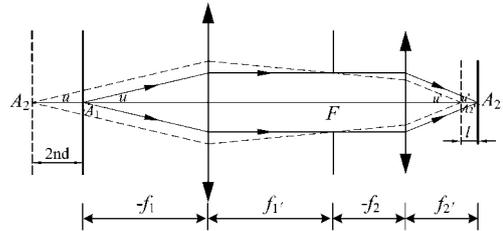


图 9 平面镜与第 n 个阶梯镜所对应的二次成像过程
Fig 9 The second imaging processing corresponding to plane mirror and the n th step mirror

平面镜物面与第 n 个阶梯所对应的物面经过后置成像系统后的成像过程如图 10 所示。平面镜物面的高斯像面为 A'_1 , 第 n 个阶梯所对应的物面的高斯像面为 A'_2 。为了平衡两个高斯像面上的二次像点在同一探测平面上弥散斑的尺寸, 需要将探测器放在两个高斯像面的中间位置, 如图 10 中实线位置所示。

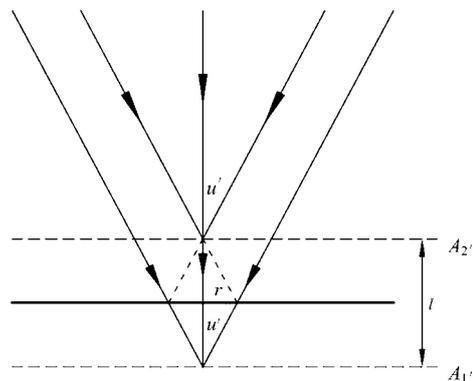


图 10 接收平面上的干涉成像过程光路图
Fig 10 Optical path of interference imaging processing on received plane

设探测器的像元尺寸为 p , 为了得到较高的图像质量, 弥散斑的半径 r 要小于半个像元的尺寸, 即

$$r = \frac{l}{2} \tan u' \leq \frac{p}{2} \quad (14)$$

所以, 后置成像系统的出射孔径角应满足如下关系

$$\tan u' \leq \frac{p}{l} = \frac{p}{2nd\beta^2} \quad (15)$$

因此, 入射孔径角应满足如下关系

$$\tan u = \beta \tan u' \leq \frac{p}{2nd\beta} \quad (16)$$

根据以上分析对后置成像系统进行设计^[12-13], 具体设计参数为: 光谱范围取 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 垂轴放大倍率取 0.12, 弥散斑半径 $\leq 15 \mu\text{m}$, 入射孔径角 $\leq 57.38^\circ$ 。后置成像系统光学镜头结构如图 11 所示, 调制传递函数曲线如图 12 所示, 调制传递函数在特征频率处大于 0.5, 说明系统成像质量优良。

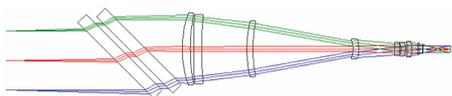


图 11 后置成像系统光学镜头结构图

Fig 11 Layout of reimaging system

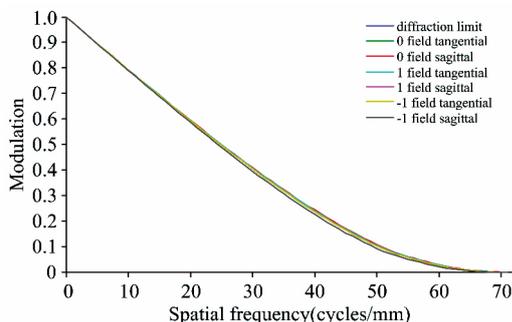


图 12 后置成像系统调制传递函数

Fig 12 MTF curve of reimaging system

5 结 论

为了实现傅里叶变换成像光谱仪的静态化,并增加成像光谱仪系统的光通量,本文提出了一种基于多级微镜的时空混合调制傅里叶变换成像光谱仪结构。该成像光谱仪结构采用一面满足系统干涉图采样要求的多级微镜代替时间调制傅里叶变换成像光谱仪中的动镜,利用多级微镜的阶梯步长对前置光学系统成像光束的光程差进行调制,通过后置成像系统获得目标景物的干涉图像。干涉系统的光谱信噪比与系统的图像信噪比成正比,与系统的光谱带宽、多级微镜的采样间隔以及多级微镜阶梯级数的平方根为反比。为了保证每一个阶梯面所对应的相干像点具有恒定的光程差,前置成像系统采用像方远心光路结构,后置成像系统采用双远心光路结构。通过对前置成像系统的理论分析,得到了采样光程差与视场角之间的函数关系;通过对后置成像系统的理论分析,得到了入射孔径角的最大容限。根据对系统的分析结果,对前置成像系统与后置成像系统进行了光学设计,设计结果显示系统具有良好的成像质量。

References

- [1] WANG Jian-yu, SHU Rong, LIU Yin-nian, et al(王建宇, 舒 嵘, 刘银年, 等). Introduction of Imaging Spectrum Technology(成像光谱技术导论). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2011. 79.
- [2] Celine Benoit-Pasanau, Frederic Gillard, Yann Ferrec, et al. Applied Optics, 2012, 51(11): 1660.
- [3] Yann Ferrec, Jean Taboury, Herve Sauer, et al. Applied Optics, 2011, 50(23): 4656.
- [4] Yann Ferrec, Jean Taboury, Herve Sauer, et al. Applied Optics, 2011, 50(30): 5894.
- [5] Yann Ferrec, Noura Ayari-Matallah, Pierre Chavel, et al. Optical Engineering, 2012, 51(11): 111716-1.
- [6] ZHANG Chun-min, JIAN Xiao-hua. Optics Letters, 2010, 35(3): 366.
- [7] ZHANG Chun-min, WU Hai-ying, Li Jie. Optical Engineering, 2011, 50(6): 066201-1.
- [8] MENG Xin, LI Jian-xin, ZHU Ri-hong, et al(孟 鑫, 李建新, 朱日宏, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, 33(2): 0230001-1.
- [9] LI Jian-xin, MENG Xin, ZHOU Wei, et al(李建新, 孟 鑫, 周 伟, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 32(12): 0123001-1.
- [10] LIU Yang-yang, LÜ Qun-bo, ZENG Xiao-ru, et al(刘扬扬, 吕群波, 曾晓茹, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2013, 62(6): 060203-1.
- [11] PEI Lin-lin, LÜ Qun-bo, WANG Jian-wei, et al(裴琳琳, 吕群波, 王建威, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2014, 63(21): 210702-1.
- [12] FU Qiang, HUANG Min, JING Juan-juan, et al(付 强, 黄 旻, 景娟娟, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(10): 1022002-1.
- [13] ZHENG Yu-quan, GAO Zhi-liang(郑玉权, 高志良). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2012, 20(12): 2645.

Analysis and Design of Interference Imaging System in Fourier Transform Imaging Spectrometer Based on Multi-Micro-Mirror

LÜ Jin-guang¹, LIANG Jing-qiu¹, LIANG Zhong-zhu^{1*}, TIAN Chao^{1,2}, QIN Yu-xin¹

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To realize the static state and high throughput of Fourier transform imaging spectrometer (FTIS), a temporal spatial mixed modulated FTIS based on multi-micro-mirror was put forward in this paper, whose interference system was based on Michelson interferometer with a multi-micro-mirror to replace the plane mirror. The remarkable characteristics of this FTIS were no movable parts and slit existing in this system, and the interferogram and image of object could be gained at the same time. The fore-optics system imaged the object on the plane mirror and multi-micro-mirror of the interference system, due to the structure feature of multi-micro-mirror, the optical path difference (OPD) of two imaging beam could be modulated. Through the re-imaging system, the image of object with different interference order could be obtained. By means of the analysis to the spectrum signal-to-noise ratio (SNR) of interference system, the relationship between spectrum SNR and image SNR was definite, and the characteristic parameters of multi-micro-mirror were determined. To ensure the constancy of OPD corresponding to each step plane, by means of the analysis to the imaging process of fore-optics system, the optical path structure of telecentric in image space was determined. According to the calculation of the relationship between field of view and OPD, the design indexes of fore-optics system were determined and the optical design was completed. To ensure no extra OPD was introduced by re-imaging system, through the analysis of the imaging feature by re-imaging system, the optical path structure of double telecentric was determined. According to the calculation of the relationship between incidence aperture angle and step number, the optical system that satisfied the system requirement was designed. By means of the theory analysis and optical design to each unit system, this research can provide a novel development strategy for static and high throughput FTIS.

Keywords Imaging spectrometer; Temporal spatial mixed modulation; Fourier transform; Interference imaging; Spectrum SNR

(Received Aug. 17, 2014; accepted Dec. 29, 2014)

* Corresponding author