

固体马赫-曾德尔成像光谱仪反演模型及误差分析

康 丽^{1,2} 黄 旻¹ 聂云峰¹ 付 强¹

(¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094)
(² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 基于一种固体马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)成像光谱仪,从理论上严格推导了其光谱反演模型,通过该光谱反演模型着重分析了反射面平移误差对系统光谱反演带来的影响。运用 Zemax 软件建立了成像光谱仪的仿真模型,并运用该仿真模型对固体马赫-曾德尔成像光谱系统光谱反演及平移误差推导结果进行了仿真验算。理论推导及仿真结果表明,固体马赫-曾德尔成像光谱仪中反射面的平移误差将对系统的光谱反演结果带来影响,并且光谱的反演误差与两路剪切分光光路中反射面平移误差的总和相关。因此,在固体马赫-曾德尔成像光谱仪的研制过程中,需要严格控制两路平移误差的总和,或通过适当的补偿遏制其对测量结果的影响,提高系统的光谱测量精度。

关键词 光谱学;干涉成像光谱技术;光谱反演模型;平移误差;傅里叶变换;Zemax 验证;马赫-曾德尔成像光谱仪
中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0311002

Spectral Inversion Modeling and Manufacture Tolerance Analysis of a Solid Mach-Zehnder Imaging Spectrometer

Kang Li^{1,2} Huang Min¹ Nie Yunfeng¹ Fu Qiang¹

(¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)
(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A spectral inversion model of solid Mach-Zehnder imaging spectrometry is derived strictly. Based on the model, the influences of the reflector translation error on the spectral inversion are analyzed. Zemax software is used to establish the simulation model of the imaging spectrometry. The simulation model is then adopted to simulate the function of solid Mach-Zehnder imaging spectrometry and verify the validity of the theoretical derivation. Both theoretical analyses and simulation results indicate that the reflector translation error of solid Mach-Zehnder imaging spectrometry influences the spectral inversion, and the spectral inversion error relates to the sum of the reflector translation errors in the two shearing light paths. Therefore, it is necessary to strictly control the sum of two translation errors or compensate the measurement errors properly to improve the spectral accuracy of the measurement system.

Key words spectoscopy; interference imaging spectroscopy; spectral inversion model; translation error; Fourier transform spectroscopy; Zemax verification; Mach-Zehnder imaging spectrometry

OCIS codes 300.6300; 070.4790; 110.1758; 350.4600

1 引 言

高光谱成像探测作为空间对地观测及物体目标识别极其重要的一种技术,已广泛应用于空间遥感,对地观测,以及大气、海洋探测等诸多领域^[1-5]。依

照重构数据立方体的方式不同,光谱成像技术主要分为直接型和间接型两大类。直接型包括色散型、滤光片型和二元光学元件型,间接型包括干涉型和计算层析型^[6-13]。干涉型成像光谱仪因其具有光

收稿日期: 2013-09-11; 收到修改稿日期: 2013-11-07

基金项目: 国家杰出青年科学基金(61225024)

作者简介: 康 丽(1988—),女,硕士研究生,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: kangxialin@sina.com

导师简介: 黄 旻(1976—),男,博士,研究员,主要从事光谱成像技术和光学遥感等方面的研究。

E-mail: huangmin@aoe.ac.cn

通量大、光谱分辨率高和体积小等诸多特点在遥感及其他领域具有重要的研究价值^[14]。

横向剪切型干涉成像光谱仪作为一种重要的高光谱成像技术,具有不受口径大小和狭缝通光限制、抗干扰能力强、结构简单、造价低廉和体积小等优点^[15]。目前 Sagnac 型横向剪切干涉仪在空间调制型干涉成像光谱仪中已得到成功应用,但是这种结构存在缺点,即进入干涉仪的光有一半会沿原入射方向返回光源,形成杂散光^[16]。固体马赫-曾德尔(M-Z)横向剪切型干涉成像光谱仪(M-Z 成像光谱仪)作为一种新型的成像光谱技术,具有无回溯光产生、杂散光影响小等优点^[17]。

在固体 M-Z 成像光谱仪中,横向剪切分光模块由四块完全相同的直角棱镜和两个完全相同的非对称五角棱镜粘合而成,直角棱镜胶合面镀分束膜,构成一个分光棱镜。其中,非对称五角棱镜中非对称反射面的平移量直接决定了系统的横向剪切量,其加工过程中存在的平移误差将给系统带来光谱反演

误差。本论文严格推导了固体 M-Z 成像光谱仪的光谱反演模型,通过该模型分析了系统中各反射面的平移误差对光谱反演带来的影响,并通过 Zemax 仿真软件验证了光谱反演模型及误差推导结果的正确性,对固体 M-Z 成像光谱仪的工程设计具有重要的指导意义。

2 测量原理及光谱反演模型的建立

如图 1 所示为固体 M-Z 成像光谱仪原理光路,由前置光学系统、准直透镜、M-Z 横向剪切分光模块、傅氏镜和探测器等部分组成。前置光学系统将地物目标成像在准直透镜的前焦平面位置,经准直透镜形成平行光束并入射到 M-Z 横向剪切分光模块。M-Z 横向剪切分光模块将一束平行光横向剪切成一束具有一定剪切量且光程差与入射角具有一定关系的平行光束。由 M-Z 横向剪切分光模块剪切后的两束光经傅氏镜会聚后在探测器上形成一个干涉斑。

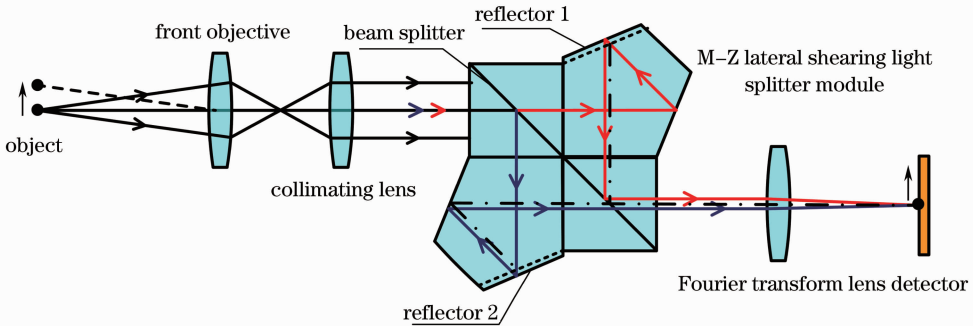


图 1 固体 M-Z 成像光谱仪测量原理

Fig. 1 Measurement principle of the solid Mach-Zehnder imaging spectrometry

当地物目标相对于该成像光谱仪移动时,其在面阵探测器上所成的干涉斑也对应移动,且形成干涉斑的两束平行光束的光程差对应变化。因此,地物目标在面阵探测器上形成一系列光程差连续变换

的干涉光斑。通过对具有不同光程差的干涉光斑的光谱反演,可以得到该地物目标所包含的光谱信息。

如图 2 所示,设进入 M-Z 横向剪切分光模块的平行光束与光轴之间的夹角为 θ ,在玻璃材料中的

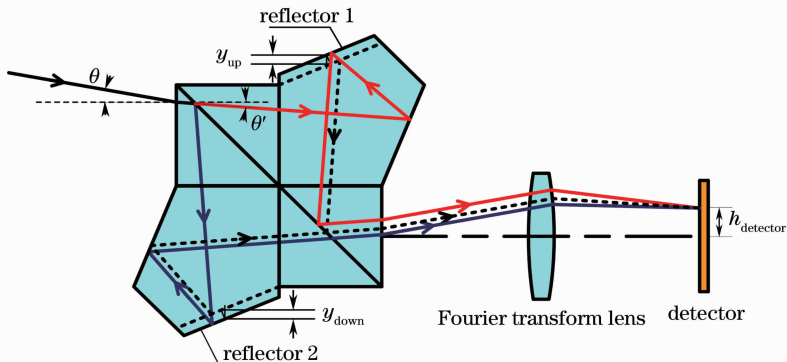


图 2 光程差与入射角的对应关系

Fig. 2 Corresponding relation between optical path difference and incident angle

折射角为 θ' ，镜面 1 沿竖直方向向上偏离标准面的距离为 y_{up} 。根据棱镜展开可以得到，经镜面 1 反射

的光束相对于镜面 1 未有偏置时反射的光束引入的光程差为

$$\delta_{\text{up}} = 2ny_{\text{up}}\cos^2 22.5^\circ / \cos \theta' - y_{\text{up}}\sin 45^\circ \sin \theta + 2y_{\text{up}}\cos^2 22.5^\circ \tan \theta' \sin \theta, \quad (1)$$

式中 $\sin \theta = n \sin \theta'$ ， n 为玻璃材料的折射率。

同理，当镜面 2 沿竖直方向向下偏离标准面的距离为 y_{down} 时，经镜面 2 反射的光束相对于镜面 2 未有偏置时反射的光束引入的光程差为

$$\delta_{\text{down}} = 2ny_{\text{down}}\cos^2 22.5^\circ / \cos \theta' + y_{\text{down}}\sin 45^\circ \sin \theta + 2y_{\text{down}}\cos^2 22.5^\circ \tan \theta' \sin \theta. \quad (2)$$

因此，由 M-Z 横向剪切分光模块出射的两束平行光的相对光程差为

$$\begin{aligned} \delta_{\text{up-down}} = \delta_{\text{up}} - \delta_{\text{down}} = & -(y_{\text{up}} + y_{\text{down}})\sin 45^\circ \sin \theta + 2n(y_{\text{up}} - y_{\text{down}})\cos^2 22.5^\circ / \cos \theta' + \\ & 2(y_{\text{up}} - y_{\text{down}})\cos^2 22.5^\circ \tan \theta' \sin \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

在固体 M-Z 成像光谱仪的设计中，要求镜面 1 的偏离量 y_{up} 与镜面 2 的偏离量 y_{down} 相等，即 $y_{\text{up}} = y_{\text{down}} = y_{\text{design}}$ ，此时(3)式简化为

$$\delta_{\text{up-down}} = -2y_{\text{design}}\sin 45^\circ \sin \theta. \quad (4)$$

(4)式表明，相对光程差与反射镜的偏移量以及视场角有关，而与玻璃材料的折射率无关。因此，材料的色散不会对反演结果产生影响。当 M-Z 横向剪切分光模块的光束倾角为 θ 时，由傅氏镜聚焦的干涉光斑的位置为

$$h_{\text{detector}} = f'_{\text{Fourier}} \tan \theta, \quad (5)$$

式中 f'_{Fourier} 为傅氏镜的焦距， h_{detector} 为探测面上光斑

距离轴线的高度， $|h_{\text{detector}}| \leq a/2$ ， a 为面阵探测器的垂轴尺寸。

将(5)式代入(4)式可以得到探测面上干涉光斑位置为 h_{detector} 时对应光束光程差大小

$$\delta_{\text{up-down}} = -2y_{\text{design}}\sin 45^\circ \sin[\arctan(h_{\text{detector}}/f'_{\text{Fourier}})]. \quad (6)$$

当 $h_{\text{detector}} = -a/2$ 时， $\delta_{\text{up-down}} = \delta_{\text{max}}$ ；当 $h_{\text{detector}} = a/2$ 时， $\delta_{\text{up-down}} = \delta_{\text{min}}$ 。

根据傅里叶光谱反演算法，可以得到地物目标的光谱为

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta_{\text{up-down}})T(\delta_{\text{up-down}})\exp(-i2\pi\nu\delta_{\text{up-down}})d\delta_{\text{up-down}}, \quad (7)$$

式中

$$T(\delta_{\text{up-down}}) = \begin{cases} 1, & \delta_{\text{min}} \leq \delta_{\text{up-down}} \leq \delta_{\text{max}} \\ 0, & (\delta_{\text{up-down}} \geq \delta_{\text{max}}) \text{ or } (\delta_{\text{up-down}} \leq \delta_{\text{min}}) \end{cases}$$

当探测面为离散面阵探测器时，设面阵探测器两像元间的间距为 Δh ，则采用数值积分方法，(7)式可以推导为

$$B(\nu) = \sum_{n=-n_{\text{max}}}^{+n_{\text{max}}} I(n\Delta h)\exp[-i2\pi\nu\delta_{\text{up-down}}(n)][\delta_{\text{up-down}}(n+1) - \delta_{\text{up-down}}(n)], \quad (8)$$

式中 $\delta_{\text{up-down}}(n)$ 为与面阵探测器上第 n 个像元相对应的光程差值，其相互之间的关系可由(6)式得到。

3 Zemax 验证

为验证 M-Z 干涉成像光谱仪的工作原理及光谱反演算法，本论文采用 Zemax 软件对图 3 所示的光路进行仿真。该仿真系统中，准直物镜和傅里叶成像镜是对称放置的两组镜片，焦距 $f=160$ mm，系统的光瞳 $D=30$ mm，光谱分辨率约为 $0.03 \mu\text{m}$ 。假设地物

目标为多光谱目标，镜面 1 与镜面 2 的偏离量为 $y_{\text{design}}=1.0648$ mm，对应横向剪切量 $d=1.5059$ mm。

成像光谱仪对具有特定光谱信息的地物目标扫描，采集得到的各时刻探测器上的干涉点信息，可以等效成一个各点光谱信息一致的面目标通过光谱仪在探测器上形成的干涉图谱，并对其沿扫描方向各点进行采集。图 4 所示为包含波长 $1.65 \mu\text{m}$ 、 $1.75 \mu\text{m}$ 和 $1.85 \mu\text{m}$ 的面目标通过光谱仪采集得到的仿真干涉图谱。

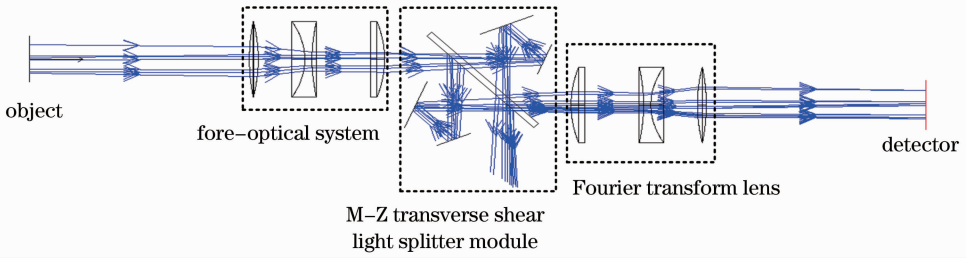


图 3 Zemax 光路仿真图

Fig. 3 Optical path simulation diagram by Zemax

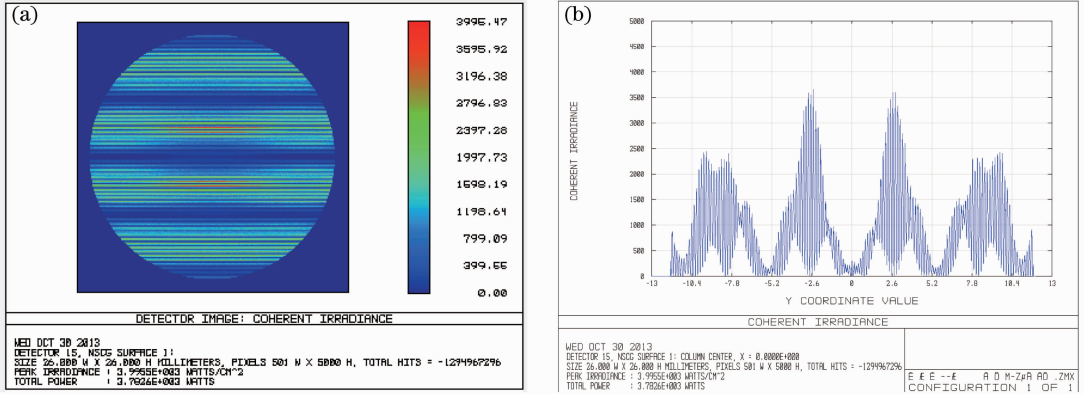


图 4 (a) 光谱仪采集得到的仿真干涉图; (b) 等效时域扫描干涉光强图

Fig. 4 (a) Simulation interferogram obtained by spectrometry; (b) equivalent time-domain scanning interference intensity diagram

对图 4 所示的仿真干涉图谱数值对称轴上的干涉点采用(8)式分别进行光谱反演,得到的光谱图如图 5 所示。由于系统仿真过程中所选用的准直镜和傅氏镜不是理想透镜,其存在的像差导致反演结果有 2nm 的偏差,该偏差相对于所反演的红外波长来说可以忽略不计。因此反演结果与仿真输入的光谱信息一致,本论文所推导的固体 M-Z 成像光谱仪的光谱反演算法正确。

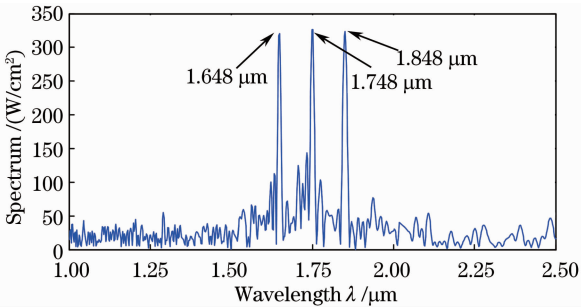


图 5 反演得到的地面目标光谱图

Fig. 5 Inversion spectrum of ground object

4 反射面平移误差带来的反演误差及仿真验证

平移误差是影响固体 M-Z 成像光谱仪的测量精度的主要误差源,系统各表面的平移都会导致系统的光程差偏离设计光程差,进而导致光谱反演结果偏离实际测量光谱。系统各表面的平移误差均可以等效成反射面 1 和反射面 2 的平移误差,因此本文仅分析反射面 1 和反射面 2 的平移误差对系统光谱探测带来的影响。

当反射面 1 的平移误差为 Δy_{up} , 反射面 2 的平移误差为 Δy_{down} , 令 $\Delta y_a = (\Delta y_{up} + \Delta y_{down})/2$, $\Delta y_b = (\Delta y_{up} - \Delta y_{down})/2$, 可以得到反射面 1 和反射面 2 的实际平移量分别为

$$\begin{cases} y'_{up} = y_{design} + \Delta y_{up} = y_{design} + \Delta y_a + \Delta y_b \\ y'_{down} = y_{design} + \Delta y_{down} = y_{design} + \Delta y_a - \Delta y_b \end{cases} \quad (9)$$

将(9)式代入(3)式可以得到当反射面 1 和反射面 2 存在平移误差时,由 M-Z 横向剪切分光模块出射的两束光束的光程差变为

$$\begin{aligned} \delta'_{\text{up-down}} &= -2(y_{\text{design}} + \Delta y_a) \sin 45^\circ \sin \theta + 4\Delta y_b \cos^2 22.5^\circ \frac{1 + \sin \theta \sin \theta'}{\cos \theta'} \approx \\ &-2(y_{\text{design}} + \Delta y_a) \sin 45^\circ \sin \theta + 4\Delta y_b \cos^2 22.5^\circ = \frac{y_{\text{design}} + \Delta y_a}{y_{\text{design}}} \delta_{\text{up-down}} + 4\Delta y_b \cos^2 22.5^\circ, \end{aligned} \quad (10)$$

根据(7)式可以得到,当存在平移误差时,解得地物目标的光谱变为

$$\begin{aligned} B'(\nu) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I\left(\frac{y_{\text{design}} + \Delta y_a}{y_{\text{design}}} \delta_{\text{up-down}} + 4\Delta y_b \cos^2 22.5^\circ\right) T\left(\frac{y_{\text{design}} + \Delta y_a}{y_{\text{design}}} \delta_{\text{up-down}} + 4\Delta y_b \cos^2 22.5^\circ\right) \times \\ &\exp(-i2\pi\nu \delta_{\text{up-down}}) d\delta_{\text{up-down}}, \end{aligned} \quad (11)$$

根据傅里叶变换的性质,忽略常数项的影响,(11)式可以进一步简化为

$$B'(\nu) = \exp\left(-i8\pi\nu \frac{y_{\text{design}} \Delta y_b \cos^2 22.5^\circ}{y_{\text{design}} + \Delta y_a}\right) B\left(\frac{y_{\text{design}}}{y_{\text{design}} + \Delta y_a} \nu\right), \quad (12)$$

因此反射面 1 和反射面 2 的平移误差 Δy_{up} 和 Δy_{down} 给系统光谱反演带来的误差为

$$\Delta\nu = \frac{y_{\text{design}} + \Delta y_a}{y_{\text{design}}} \nu - \nu = \frac{\Delta y_a}{y_{\text{design}}} \nu = \frac{\Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}}}{2y_{\text{design}}} \nu, \quad (13)$$

进而可以得到

$$\Delta\lambda = \frac{y_{\text{design}}}{y_{\text{design}} + \Delta y_a} \lambda - \lambda = -\frac{\Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}}}{2y_{\text{design}} + \Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}}} \lambda. \quad (14)$$

当目标包含的多个波长分别为 $\lambda_1 = 1.65 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 1.75 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_3 = 1.85 \mu\text{m}$, $y_{\text{design}} = 1.0648 \text{ mm}$, $\Delta y_{\text{up}} = \Delta y_{\text{down}} = 0.1 \text{ mm}$ 时,根据(14)式可以得到 $\Delta\lambda_1 = -0.142 \mu\text{m}$ 、 $\Delta\lambda_2 = -0.150 \mu\text{m}$ 、 $\Delta\lambda_3 = -0.159 \mu\text{m}$,即在该平移误差存在的情况下实际测得的光谱波长分别为 $\lambda'_1 = 1.508 \mu\text{m}$ 、 $\lambda'_2 = 1.60 \mu\text{m}$ 、 $\lambda'_3 = 1.691 \mu\text{m}$ 。如图 6 所示为当 $\Delta y_{\text{up}} = \Delta y_{\text{down}} = 0.1 \text{ mm}$ 时通过 Zemax 仿真并反演得到的光谱图,反演结果和计算值一致。

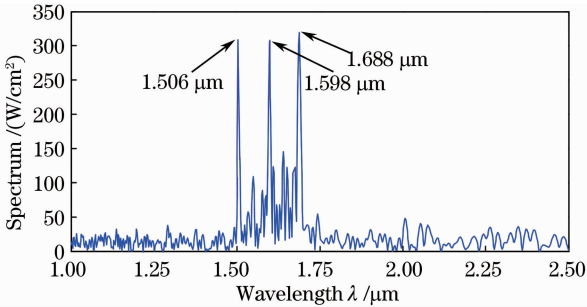


图 6 两反射面具有相同平移误差时的反演光谱图

Fig. 6 Inversion spectrum when two reflector translation errors are equal

当目标包含的多个波长分别为 $\lambda_1 = 1.65 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 1.75 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_3 = 1.85 \mu\text{m}$, $y_{\text{design}} = 1.0648 \text{ mm}$, $\Delta y_{\text{up}} = 0.05 \text{ mm}$, $\Delta y_{\text{down}} = -0.05 \text{ mm}$ 时,根据(14)式可以得到 $\Delta\lambda = 0$,即实际测得的光谱相对于真实光谱不会产生任何误差。如图 7 所示为当两反射面存在相反的平移误差时通过 Zemax 仿真并反演得到的光谱图,反演结果和推断一致。

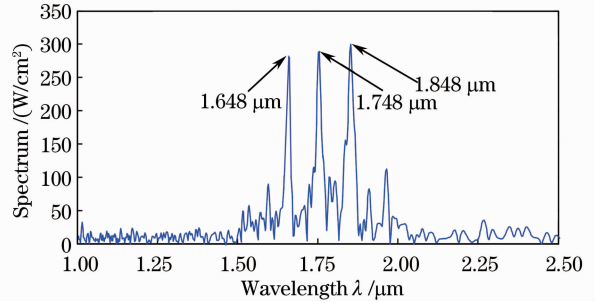


图 7 两反射面具有相反平移误差时的反演光谱图

Fig. 7 Inversion spectrum when two reflector translation errors are inverse

由(14)式及图 6 和图 7 的结论可知,光谱的反演误差与两反射面的平移误差和直接相关。图 8 所示为当 $\lambda = 1.75 \mu\text{m}$, $y_{\text{design}} = 1.0648 \text{ mm}$ 时,光谱的偏移量 $\Delta\lambda$ 与两反射面的平移误差和 $\Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}}$ 的关系曲线。当平移误差和 $\Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}} = 0$ 时,系

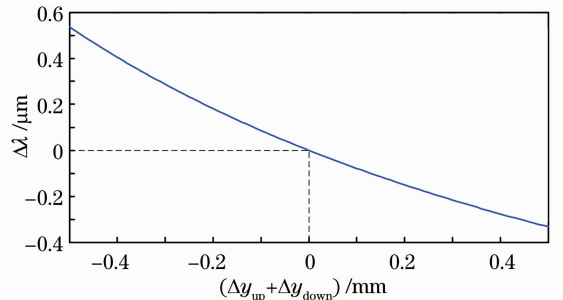


图 8 光谱的反演误差 $\Delta\lambda$ 与偏移量 $\Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}}$ 的关系

Fig. 8 Corresponding relation between $\Delta\lambda$ and

$\Delta y_{\text{up}} + \Delta y_{\text{down}}$

统不存在光谱反演误差。

5 结 论

对固体 M-Z 成像光谱仪的光谱反演模型及反射面平移误差对系统光谱反演带来的误差进行了严格的理论推导,并运用 Zemax 仿真软件对推导结果进行了仿真验算,仿真结果与理论推导结果一致。结果表明,固体 M-Z 成像光谱仪中反射面的平移误差将对系统的光谱反演结果带来直接的影响,并且光谱的反演误差与两路剪切分光光路中反射面平移误差的总和相关,与两路剪切分光光路中反射面各自的平移误差没有直接关系。因此在固体 M-Z 成像光谱仪的研制过程中,需要严格控制两路平移误差的总和,或通过适当的补偿遏制其对测量结果的影响,提高系统的光谱测量精度。推导结论对固体 M-Z 成像光谱仪的研制及关键部件的加工误差控制具有极其重要的指导意义,此外,运用 Zemax 软件仿真成像光谱仪光路也为成像光谱仪的设计提供了一种全新的技术验证手段。

参 考 文 献

- 1 M J Persky. A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for remote sensing [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(10): 4763-4797.
- 2 A R Kerb, P Dubwad, W Wadsworth, *et al.*. Fourier transform infrared spectrometer for field measurements of radiance and emissivity [J]. Appl Opt, 1996, 35(10): 1679-1692.
- 3 V A Self, P A Sermon. Fourier transform infrared cell for sudece studies at controlled temperatures and in controlled atmospheres with time resolution and spatial resolution [J]. Rev Set Infirm, 1996, 67(6): 2096-2099.
- 4 Xiangli Bin, Yuan Yan, Lü Qunbo. Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5399-5405.
相里斌,袁 艳,吕群波. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5399-5405.

- 5 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(1): 18-22.
相里斌,赵葆常,薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. 光学学报, 1998, 18(1): 18-22.
- 6 F Blechinger, D E Charlton, R Davancens, *et al.*. High-resolution imaging spectrometer (HRIS): optics, focal plane, and calibration [C]. SPIE, 1993, 1937: 207-224.
- 7 P A Jones. Imaging spectrometry using a grating in divergent light [C]. SPIE, 1993, 1937: 234-243.
- 8 J C Demro, R Hatrshorne, L M Woody, *et al.*. Design of a multispectral, wedge filter, remotesensing instrument incorporating a multi-port, thinned CCD array [C]. SPIE, 1995, 2480: 280-286.
- 9 T Vo-Dinh, F Moreau, D M Hueber, *et al.*. Multispectral imaging system using acousto-optic tunable filter (AOTF) [C]. SPIE, 1996, 2819: 268-273.
- 10 Michele Hinrichs, Mark Massie. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics [C]. SPIE, 1997, 3118: 194-205.
- 11 D Simeoni. New concept for a highly compact imaging Fourier transform spectrometer (IFTS) [C]. SPIE, 1991, 1479: 127-138.
- 12 M R Cater, C L Bennett, D J Fields, *et al.*. Livemore imaging Fourier transform infrared spectrometer [C]. SPIE, 1995, 2480: 380-386.
- 13 P A Berhardt, J A Antoniadis. Hyper-spectral imaging using rotational spectrotomography [C]. SPIE, 1995, 2480: 78-92.
- 14 Xiangli Bin. Spectral technique for interference imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(6): 116-119.
相里斌. 干涉成像光谱技术[J]. 光电工程, 1998, 25(6): 116-119.
- 15 P Hariharan. Basic of Interferometer (2nd Edition) [M]. Pittsburgh: Acadeuic Press, 2006. 94-95.
- 16 Jin Xizhe, Yu Bingxi. The history and current status of imaging Fourier transform spectrometer (IFTS) [J]. Changchun Inst of Optics and Fine Mech, 1998, 21(4): 25-32.
金锡哲,禹秉熙. 干涉成像(傅立叶变换)光谱仪发展概述[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1998, 21(4): 25-32.
- 17 Fu Qiang, Xiangli Bin, Lü Qunbo, *et al.*. Design of a dual-channel Mach-Zehnder lateral shearing interferometer for the large apterure static imaging spertrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 553-557.
付 强,相里斌,吕群波,等. 大孔径静态干涉成像光谱仪中双通道 Mach-Zehnder 横向剪切干涉仪的设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 553-557.

栏目编辑: 李志兰