

# 空间调制干涉光谱成像仪光谱定标技术研究\*

高静<sup>1,2</sup>, 计忠瑛<sup>1</sup>, 崔燕<sup>1,2</sup>, 石大莲<sup>1</sup>, 周锦松<sup>1,2</sup>, 相里斌<sup>1,3</sup>, 王忠厚<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 中国科学院光电研究院, 北京 100190)

**摘要:** 为了对干涉光谱成像仪进行光谱定标, 针对空间调制该仪器的原理, 得出了其光程差和光谱分辨率的计算方法, 并分析了仪器的线型函数. 在实验中使用多种单色光源(波长范围: 450~950 nm)和扩束准直镜(焦距 120 mm、口径 50 mm)进行光谱定标测试. 结果表明: 影响实验室光谱定标不确定度的主要因素为  $d/f$  的测量误差和标准光谱的误差.

**关键词:** 光谱定标; 傅里叶变换; 不确定度

**中图分类号:** TP731

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)11-2853-4

## 0 引言

干涉光谱成像技术是 20 世纪 90 年代前后发展起来的一种新型的光谱成像技术, 由于它在原理上具有高光谱分辨率和高能量利用率等优点, 近年来受到了广泛关注.

空间调制干涉光谱成像仪作为无动件的干涉光谱成像仪, 与传统色散型光谱成像仪的区别在于它是基于干涉仪的干涉, 在探测器上得到地物目标的一维空间信息和一维光谱信息, 并通过推扫成像得到地物目标的另一维空间信息, 因此近几年在航空航天领域、地矿资源的判别、减灾预报及环保、生物医学诊断、军事侦察等方面的应用发展很快<sup>[1-2]</sup>.

干涉光谱成像仪的定标是干涉光谱成像技术应用的一个重要环节, 是指确定遥感器输出准确数值的过程, 主要手段是测定遥感器对一个已知辐射特征目标的响应<sup>[3-4]</sup>. 定标主要包括光谱定标和辐射定标. 光谱定标就是测量光谱成像仪随入射辐射波长变化的响应, 其主要目的是确定探测器不同光谱通道中心波长的位置和光谱分辨率. 光谱定标是保证干涉光谱成像仪真实有效的获得地物目标光谱的首要工作. 本文研究了空间调制干涉光谱成像仪的光谱定标原理及实验方法, 并评价了该光谱定标方法的不确定度.

## 1 光谱定标原理

光谱定标通过确定干涉图零光程差位置、频率

以及最大光程差, 确定各谱段的中心波长位置和光谱分辨率<sup>[5]</sup>. 空间调制型干涉光谱成像仪的光学系统原理见图 1.

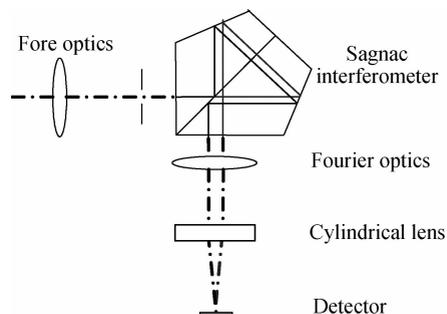


图 1 SMIFTS 的光学系统原理

Fig. 1 Optical principle schematic of SMIFTS

理论上, 波数范围为  $\nu_1 \sim \nu_2$ , 空间调制干涉光谱成像仪输出信号为

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu) \cos(2\pi\nu L) d\nu \quad (1)$$

式中:  $B(\nu)$  表示入射光谱强度,  $L$  表示光程差,  $\nu$  表示波数.

如果系统输入的是充满光瞳均匀的单色光, 则单色光的干涉图是等间隔的干涉条纹, 它的频率反映了波数  $\nu_1$ . 干涉图的相位因子为  $2\pi\nu x = 2\pi n$ , 当  $n$  为正整数时干涉条纹为亮纹,  $n$  条亮纹的光程差  $x_n$  表示为

$$x_n = d \cdot N_n \cdot s / f = n / \nu = n \cdot \lambda \quad (2)$$

则

$$d / f = n \cdot \lambda / N_n \cdot S \quad (3)$$

式中:  $d$  表示干涉仪剪切量;  $N_n$  表示  $n$  对条纹占有的像元数;  $s$  表示光谱方向的像元尺寸;  $f$  表示付氏镜的焦距. 若一个像元对应的光程差 DOPD 为

$$\text{DOPD} = d \cdot s / f \quad (4)$$

\* 国家重点基础研究发展计划(2009CB724005)资助

Tel: 029-88887631

Email: gaojing@opt.ac.cn

收稿日期: 2009-01-12

修回日期: 2009-01-19

将式(4)代入式(3),则有

$$\text{DOPD} = n \cdot \lambda / N_n \quad (5)$$

所以,仪器的最大光程差为

$$L = \text{DOPD} \cdot N_i \quad (6)$$

式中  $N_i$  为仪器面阵探测器的光谱方向的总像元数.由上可知, $d/f$  的选取直接影响到光程差的计算.将具有已知中心波长的标准单色光输入干涉光谱成像仪,就可以计算干涉光谱成像仪实际的 DOPD,得出仪器的最大光程差  $L$ .

半峰全宽,定义为截断函数半峰值处的宽度  $\Delta\nu$ ,为

$$\Delta\nu = 1.21/2L \quad (7)$$

仪器的光谱分辨率由 Rayleigh 法则确定,即

$$\delta\nu = 1/2L \quad (8)$$

式中  $\delta\nu$  表示波数分辨间隔.因此测得干涉图最大光程差,就可以确定光谱分辨率.

实际得到的干涉图是理想干涉图与截断函数的乘积,也即是

$$I_r(x) = I_i(x) \cdot T(x) \quad (9)$$

式中,  $I_r(x)$  为实际得到的干涉数据,  $I_i(x)$  为理想情况下的干涉数据,

$$T(x) = \text{rect}(x/2L) = 1 \quad (10)$$

(对任意  $|x| \leq L$ ,  $L$  为最大光程差),  $T(x)$  为矩形截断函数.相应的复原光谱数据变为

$$B_r(\nu) = B_i(\nu) * t(\nu) \quad (11)$$

式中,  $B_r(\nu)$  为实际得到的光谱数据,  $B_i(\nu)$  为理想情况下的光谱数据,“\*”表示卷积运算,  $t(\nu)$  为截断函数的逆傅里叶变换,也即是

$$\begin{aligned} t(\nu) &= F^{-1}\{T(x)\} = \\ &2L \cdot \frac{\sin(2\pi\nu L)}{2\pi\nu L} = \\ &2L \cdot \text{sinc}(2\pi\nu L) \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $t(\nu)$  即为仪器线型函数 (Instrumental Line Shape, ILS), 可以看作是输入单脉冲光谱情况下的经由干涉仪得到的光谱.同时,对于光谱  $B_i(\nu)$  来说,其波数范围也在仪器设计过程中被限定在某一范围  $[\nu_1, \nu_2]$  内,因此,实际得到的光谱数据为

$$B_r(\nu) = [B_i(\nu) \cdot T(\nu_2 - \nu_1)] * t(\nu) \quad (13)$$

由此可见,实际影响复原光谱的因素有两个方面,一是光谱截断函数  $T(\nu_1 - \nu_2)$ ,二是仪器线型函数.光谱截断函数由仪器设计过程中的光学器件决定,不同的选择将对复原光谱产生不同的影响; SMIFTS 的 ILS 为  $\text{sinc}$  函数,它是一个振荡收敛函数,如图 2,其特点是有一系列的正负旁瓣,正值旁瓣往往是虚假信号的来源,而强大的负旁瓣(为主峰强度的 22%)又常使邻近的微弱光谱信号被淹没.

为了消除  $\text{sinc}$  函数正负旁瓣的影响,通常需要在干涉数据复原光谱数据的过程中,乘以一个权重函数,称之为数据切趾.在 SMIFTS 的光谱复原中,采用三角函数切趾,切趾函数可以较好的消除仪器线型函数正负旁瓣的影响,提高光谱的信噪比,但是会将复原光谱数据的分辨率降低一倍<sup>[6-8]</sup>.

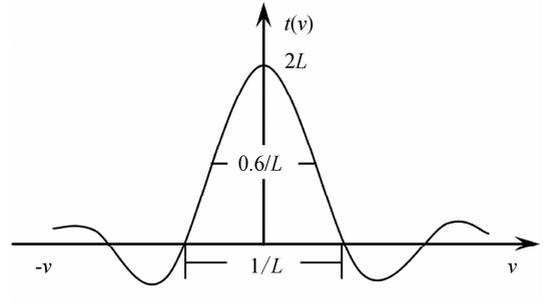


图 2 仪器线型函数

Fig. 2 Instrumental Line Shape

## 2 光谱定标的测试方法

经过实验,提出了空间调制干涉光谱成像仪实验室光谱定标的方法,其实验装置图如图 3.

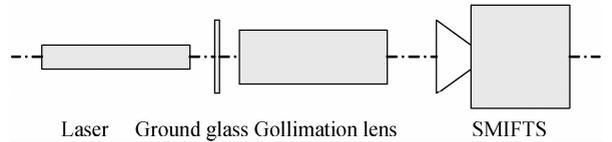


图 3 实验室光谱定标实验装置

Fig. 3 Lab spectral-calibration system of SMIFTS

实验装置由激光器、毛玻璃、扩束准直镜组成.激光器发出特征峰明显的单色光谱,其能量满足仪器响应的要求;毛纸放置于扩束准直镜的焦面位置,被激光束照明后发出均匀的漫射光;扩束准直镜是能够改变激光光束直径和发散角的透镜组件,激光束通过扩束镜的调节使激光光束变为准直(平行)光束,才能满足光谱仪成像的需要.光谱定标时要求单色光必须充满光谱成像仪视场的光谱方向.光谱成像仪的入瞳为  $\Phi 36$  mm,实验室现有扩束准直镜(焦距 120 mm,口径 50 mm),能够满足超光谱仪光谱方向全孔径充满的要求,并使毛纸产生的漫射均匀光准直为平行光.因此,这种光谱定标的光路是完全可行的.

实验时,超光谱成像仪采集目标光谱信息的干涉图,软件复原后的干涉图与标准激光光谱数据对比,达到对仪器光谱定标的目的.

采集到的干涉图数据,读取  $N_n$  条激光干涉条纹所占的像元数,并按式(5)计算干涉仪剪切量,读取最大光程差,按式(3)计算光谱分辨率,完成光谱定标.为了提高光谱定标的精度,减小随机误差,采取多次(30次)采集和在不同区域选取不同  $n$  数条

纹的方法,通过多次取值计算取平均值作为计算结果。

试验共采用 5 种波长的激光进行光谱定标,这 5 种激光为氦氖激光器、氩离子激光器和半导体激光器,前两种激光器公认的波长精度可达 0.1 nm,后者在室温下波长漂移 < 1 nm,用光谱辐射计测波长精度为 1 nm. 这五种波长可以较为均匀的覆盖光谱成像仪的整个光谱范围。

### 3 光谱定标测试结果

由式(2)和(3)可知,仪器的光谱分辨率与采集的激光波形的半峰全宽之间的对应关系为

$$\Delta v = 1.2\delta v \quad (14)$$

故将复原后的激光波形的半峰宽度除以 2.4 (1.2×2)倍再与仪器理论分辨率进行对比. 为方便比较分析,现将理论分辨率转换为理论半峰宽,计算复原后半峰宽的误差,图 4 为用 632.8 nm 的氦氖激光器光谱定标时得到的激光干涉图。

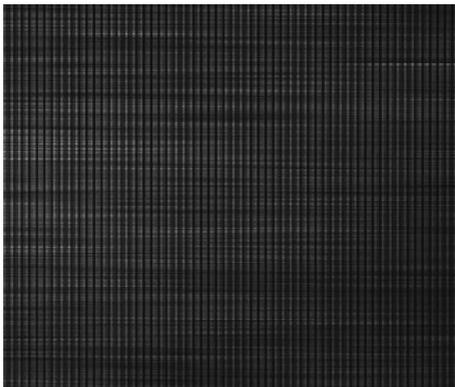


图 4 SMIFTS 的激光干涉图

Fig. 4 Laser Interferogram of SMIFTS

在处理数据的过程中发现: $d/f$  的选取对光谱定标的精度影响很大:同一个波长的激光干涉图,选取不同行区域和不同  $n$  数条纹计算出的  $d/f$  都各不相同;用不同波长的激光干涉图计算出的  $d/f$  也各不相同,对文中五个光谱进行复原后,会得到不同的光谱复原精度. 分析原因,探测器像元有一定的尺寸,探测器焦面组件在装调定位中的误差会导致像元行列与干涉条纹的不平行,在选取区域内会存在不完整干涉周期的出现,再加上测量的的误差,都会使  $N_n$  产生读取误差,从而影响  $d/f$  的计算精度. 为了提高光谱定标的精度,通过反复计算分析,本文采用了多波长取值法,即在每个激光波长干涉图中选取同一区域计算  $d/f$  和 DOPD,用每个 DOPD 对其他光谱进行复原,在复原结果中选取最接近标准光谱的结果,用此结果对应的 DOPD 为最佳值来进行光谱复原,而其他波长的 DOPD 的复原结果作为误差计算入光谱复原的不确定因子中。

用该方法得出的 DOPD 进行光谱复原后,可以得到较小的中心波长误差和半峰宽误差,从而提高光谱复原的精度. 图 5 为采用多波长取值法对图 4 进行光谱复原后得到的复原光谱图,因标准谱与复原谱的偏差很小,图中不好分辨,在这里只做文字说明即可。

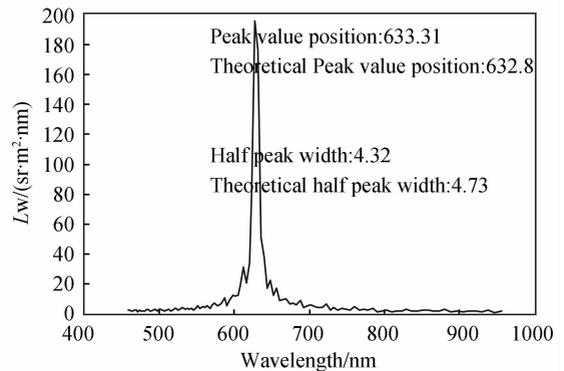


图 5 复原光谱

Fig. 5 Reconstruction spectrum

表 1 为从五个标准光谱的干涉图中均选取第 150~300 行数据计算出的 DOPD,用每个 DOPD 对所有干涉图数据进行复原,得出结果用 632.8 nm 计算的 DOPD 复原光谱的平均误差最小,为最佳 DOPD,其复原结果即为最佳光谱复原结果。

表 1 激光 DOPD 数据

激光峰值/nm	488	594.5	632.8	784.5	850
DOPD/nm	220.88	220.21	220.67	219.52	221

表 2 为采用多波长取值法处理干涉数据后得到的光谱定标实验结果. 由表中数据结果可知,光谱复原后中心波长的平均误差为:0.288 nm,光谱复原软件的算法产生复原半峰宽的平均误差为:0.708 nm。

表 2 激光光谱定标数据表

理论光谱值/nm	复原光谱值/nm	误差绝对值/nm	理论半峰宽/nm	复原半峰宽/nm	误差绝对值/nm
488	488.24	0.24	2.81	2.63	0.18
594.5	594.6	0.10	3.12	3.95	0.83
632.8	633.31	0.51	4.73	4.32	0.41
784.5	784.97	0.47	7.66	6.61	1.05
850	849.88	0.12	9.00	7.93	1.07

任何遥感数据都具有一定的不确定度,它表征遥感数据的可置信程度. 根据误差理论及测量不确定度的评定理论分析,此时的光谱定标精度为影响光谱定标精度的各个环节的标准不确定度的加权平方和的正平方根<sup>[9]</sup>. 根据仪器的实测数据,分析影响光谱复原中心波长位置的不确定度因子为: $d/f$  的计算误差和标准光谱误差,经计算得出:总不确定度为 1.44 nm。

## 4 结论

本文对空间调制型干涉光谱成像仪的光谱定标原理实验方法及仪器线性函数进行了研究,实验证明:用此种光谱定标方法得出的中心波长的光谱复原平均误差为:0.288 nm,光谱定标的不确定度为1.44 nm.这种光谱定标方法可较好地提高光谱定标的精度,从而保证高光谱分辨率仪器真实有效的获得地物目标光谱,使空间调制型干涉光谱成像仪在航天遥感方面得到更大的应用.

### 参考文献

- [1] XIANG-LI Bin, ZHAO Bao-chang, XUE Ming-qiu. 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.
- [2] RAFERT J B, SELLAR R G, BLATT J H. Monolithic Fourier transform imaging spectrometer[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(31):7228-7230.
- [3] GRANGER E M. A calibration method for radiometric and wavelength calibration of a spectrometer[C]. *SPIE*, 1998, **3648**:237-241.
- [4] STROBL P, MUELLER A, SCHLAEPFER D, *et al.* Laboratory calibration and in-flight validation of the digital airborne imaging spectrometer[C]. *SPIE*, 1997, **3071**:225-236.
- [5] XIANG-LI Bin, JI Zhong-ying, HUANG Man, *et al.* On the calibration of the spatially imaging fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **33**(7):850-853.  
相里斌,计忠瑛,黄曼,等.空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究[J].光子学报,2004, **33**(7):850-853.
- [6] XIANG-LI Bin, YUAN Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **35**(12):1869-1874.  
相里斌,袁艳.单边干涉图的数据处理方法研究[J].光子学报,2006, **35**(12):1869-1874.
- [7] DAVID A B, IFARRAGUERRI A. Computation of a spectrum from a single-beam fourier-transform Infrared Interferogram[J]. *Appl Opt*, 2002, **42**(6):1181-1189.
- [8] FILLER A S. Apodization and interpolation in Fourier-transform spectroscopy[J]. *JOSA*, 1964, **54**:762-767.
- [9] QIAN Shao-sheng. Uncertainty in measurement[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002, 1.  
钱绍圣.测量不确定度[M].北京:清华大学出版社,2002,1.

## Wavelength Calibration of Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer

GAO Jing<sup>1,2</sup>, JI Zhong-ying<sup>1</sup>, CUI Yan<sup>1,2</sup>, SHI Da-lian<sup>1</sup>, ZHOU Jin-song<sup>1,2</sup>,  
XIANG-LI Bin<sup>1</sup>, WANG Zhong-hou<sup>1</sup>

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract:** Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer (SMIFTS) is an instrument depended on interference, which can obtain interferential information and achieve spectral information by fourier transform. Wavelength calibration is prerequisite for SMIFTS to obtain the spectrum information exactly. The way of extreme search that uses multi-lasers(wavelength range:450~950 nm) and collimating lens is carried out for the wavelength calibration of SMIFTS. Principle, method and result of the experiment are given then. The results indicate that the primary factors influencing lab wavelength calibration's precision are two reasons: measure precision of  $d/f$  and the precision of standard spectrum.

**Key words:** Wavelength calibration; Fourier transform; Uncertainty



**GAO Jing** was born in 1973. Now she is a Ph. D. degree candidate at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS.