

文章编号: 0253-2239(2005)12-1718-4

空间调制干涉光谱成像仪光谱辐射度定标方法研究

崔 燕^{1,2} 计忠瑛¹ 高 静^{1,2} 黄 旻¹ 薛利军^{1,2} 相里斌¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 空间调制干涉光谱成像仪不同于其他类型光谱成像仪,其像面上得到一维空间信息和一维光谱信息。由于其原理特殊,定标方法尚不成熟。介绍了一种用于空间调制干涉光谱成像仪光谱辐射度定标的方法,即干涉光谱成像仪和光谱辐射度计同时采集目标辐射强度,复原采集干涉图得到的光谱图,与光谱辐射度计采集绝对光谱进行比对,得到定标系数,并分析了该方法达到的精度。结果表明:该方法可以满足空间调制干涉光谱成像仪光谱辐射度定标的要求,定标精度达到 5.74%。

关键词: 光谱学; 光谱成像; 辐射度定标; 傅里叶变换; 光谱信息; 空间信息

中图分类号: TP731 文献标识码: A

Study on the Spectral Radiometric Calibration Method of the Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer

Cui Yan^{1,2} Ji Zhongying¹ Gao Jing^{1,2} Huang Min^{1,2} Xue Lijun^{1,2} Xiangli Bin¹

(¹ Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer (SMIFTS) was different from other spectrometers. It gained one dimensional spatial information and one dimensional spectral information. Calibration of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer was imperfect for its special theory. A method of radiometric calibration is introduced, which used spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer and spectral radiometer to collect irradiance of the same target. After converted interferograms into spectrum and compared with the true spectrum collected by spectral radiometer, calibration coefficients were obtained and the calibration accuracy was analysed. The results indicated that the method can satisfy the requirement of spectral radiometric calibration by spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer, the calibration accuracy reached 5.74%.

Key words: spectroscopy; spectral imaging; radiometric calibration; Fourier transform; spectral information; spatial information

1 引 言

定标是光谱成像技术^[1]应用的一个重要的环节。当希望遥感器输出的数值符合所观察目标的辐射特性时,就需要定标。主要手段是测定遥感器对一个已知辐射特征目标的响应。它的准确性直接影响到遥感图像和光谱的质量。定标根据其使用的阶段可分为实验室定标、星上内定标和野外校正场外定标三大类。

实验室定标是定标的基础和关键,是验证光谱成像仪各项指标(响应度、信噪比等)是否达到设计要求的手段,也是以后考察任务全过程内这些参量稳定性

的初始数据。它包括光谱定标和光谱辐射度定标。

光谱辐射度定标是光谱成像仪准确得到地物目标辐射特征的重要保证。对于 CCD 相机和色散型光谱成像仪来说,其定标技术较成熟,方法也较简单。

CCD 相机直接在像面上得到地物目标的强度信息,因而只需使用积分球产生漫射光作为入射均匀光源,就可以进行 CCD 相机的辐射定标。

色散型光谱成像仪在像面上直接得到地物目标的光谱信息,虽需要辐射定标和光谱定标,但方法比较简单。常采用具有良好朗伯性和面均匀性的大口径积分球辐射源。

作者简介: 崔 燕(1979~),女,山东青州人,中国科学院西安光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光谱、定标等方面的研究。E-mail: cuiyanmw54124@sina.com.cn

收稿日期: 2004-12-28; 收到修改稿日期: 2005-04-25

干涉型光谱成像仪光谱辐射度定标与色散型光谱成像仪及 CCD 相机在内容和要求上是相似的^[2~6]。但由于原理的特殊性,定标方法复杂且还不够成熟。

2 空间调制干涉光谱成像仪原理

图 1 为空间调制干涉光谱成像仪的原理示意图^[7]。它主要由五部分组成,分别是:前置光学系统、干涉仪、傅里叶光学系统、柱面光学系统和探测器。

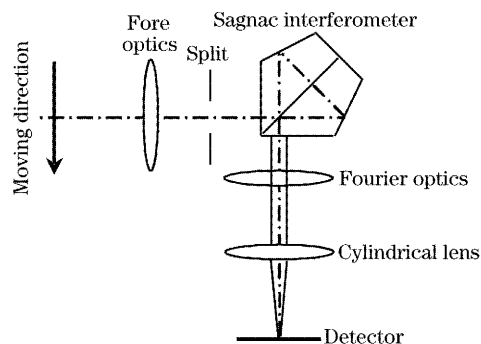


图 1 空间调制干涉光谱成像仪原理

Fig. 1 Optical principle schematic of SMIFTS

前置光学系统将地物目标成像于一次像面,此处垂直纸面放置一狭缝,位于傅里叶光学系统的前焦面上,并使探测器像面上得到一维空间图像。狭缝与傅里叶光学系统间的干涉仪将狭缝在沿其宽度方向分成两个虚狭缝,经傅里叶光学系统在焦平面上汇聚,位于傅里叶光学系统和柱面光学系统后焦面上的探测器行方向上即可得到狭缝上各视场点的干涉图。这样,某一时刻,一个面阵探测器上可以得到狭缝图像的干涉图,经逆傅里叶变换得到相应地物目标的光谱信息,即得到一维空间信息和一维光谱信息。仪器沿如图方向运动,得到另一维空间信息。

理论上,干涉图表达式为(略去常数)

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

其中, $I(x)$ 是干涉强度, x 是光程差, $B(\nu)$ 是入射光谱强度, ν 是波数。

2 光谱辐射度定标

干涉光谱成像仪经光谱辐射度定标后的干涉强度^[8,9]为

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} R_{i,j} B(\nu) \cdot \cos(2\pi\nu x) d\nu + I_{i,j}, \quad (2)$$

其中, $R_{i,j}(\nu)$ 是探测器第 i 行, j 列的光谱辐射响应, $I_{i,j}$ 是探测器的零输入响应。

$$\text{若 } R_{i,j}(\nu) = A(i,j) \cdot R(\nu), \quad (3)$$

其中 $R(\nu)$ 是探测器的光谱辐射响应, $A(i,j)$ 为像元间辐射度响应的不一致性,则

$$\frac{I(x) - I_{i,j}}{A(i,j)} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} R(\nu) \cdot B(\nu) \cdot \cos(2\pi\nu x) d\nu, \quad (4)$$

那么修正后干涉图

$$I'(x) = [I(x) - I_{i,j}] / A(i,j), \quad (5)$$

复原光谱

$$B'(\nu) = R(\nu) \cdot B(\nu), \quad (6)$$

定标系数

$$C = B'(\nu) / B(\nu) = R(\nu). \quad (7)$$

3.1 实验内容和方法

实验装置由太阳模拟器及控制系统、光谱辐射度和光学平台等实验仪器组成,装置如图 2 所示。

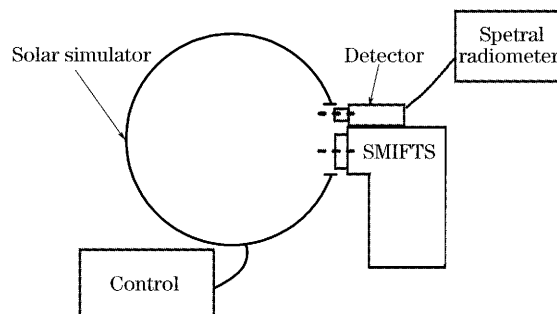


图 2 空间调制干涉光谱成像仪光谱辐射度定标

Fig. 2 Radiometric calibration of SMIFTS

太阳模拟器为美国 Labsphere 公司生产的口径 500 mm 的 XTH-2000 型太阳模拟器,其光源为一只 300 W 外置氙灯、一只 150 W 外置卤钨灯及一只内置 150 W 内置卤钨灯组成。外置氙灯和卤钨灯可通过调节光栏改变积分球输出辐亮度。三只灯同时点燃时输出一个辐强度均匀分布(100 mm 直径范围内不均匀性 1%) 的漫射光;光谱辐射计是美国 Analytical Spectral Devices, Inc 生产的。作为测量物质发射光谱强度的仪器,其标定值不确定度为 5%。

实验过程中,将光谱成像仪和光谱辐射度计同时放置于距太阳模拟器出口 100 mm 位置,并使其光轴相互平行。通过调节太阳模拟器外置光源的光栏,输出满足光谱成像仪工作辐亮度值。这样,光谱辐射度计采集的是太阳模拟器的光谱 $B(\nu)$ 。由于干涉光谱成像仪采集相应干涉图复原得到 $B'(\nu)$ 。由(7)式可以求得定标系数。

需要注意的是:为了完成定标工作,并尽可能提

高精度,实验所用太阳模拟器和光谱辐射度计应标定并进行预热。另外,为了尽可能消除随机误差,实验数据采用 10 次平均。

干涉图的处理流程图如图 3 所示。

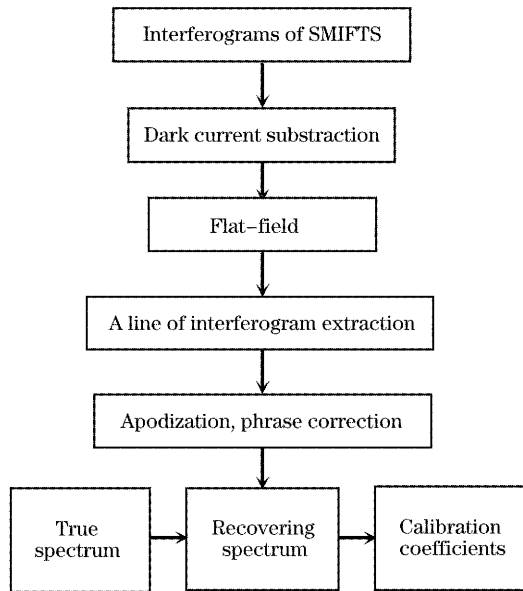


图 3 干涉图处理流程图

Fig. 3 Flow chart of interferograms

3.2 实验结果、误差及可行性分析

实验结果如图 4 所示:其中图 4(a)为用太阳模拟

器作为光源,干涉光谱成像仪采集输出的干涉图。其中行方向为光谱方向,列方向为空间方向。

任意抽取干涉图中一行数据,通过软件复原^[10],得到复原光谱图如图 4(b)中曲线 I 所示,图 4(b)中曲线 II 为其对应的绝对光谱。比较 I、II 两条曲线,可以看出由于成像过程中诸多因素的影响,直接复原的光谱数据不能准确地反映地物目标的特征。因此需要定标使仪器达到准确反映地物信息的最终目的。I 和 II 比对可以得到光谱辐射度定标系数。

用定标曲线标定另一复原光谱图,得到辐射度标定后曲线 III,基本与其绝对光谱曲线 IV 相同。由曲线 III 和 IV 能够看出,谱线携带的信息可以通过定标后复原光谱体现出来,差别之处由于探测器噪声、实验方法、实验所用仪器精度水平及光谱复原等因素造成。

实验结果表明:未经标定的复原光谱与真实光谱间存在较大差别,只有经过定标,才能如实反映真实光谱携带的信息。

任何遥感数据都有误差,它受到定标仪器自身误差及特定定标过程中各环节误差等因素的影响。其定标误差由各因素造成误差的均方和开方来确定,光谱辐射度定标实验总误差约为 5.74%,各误差因子如表 1 所示。

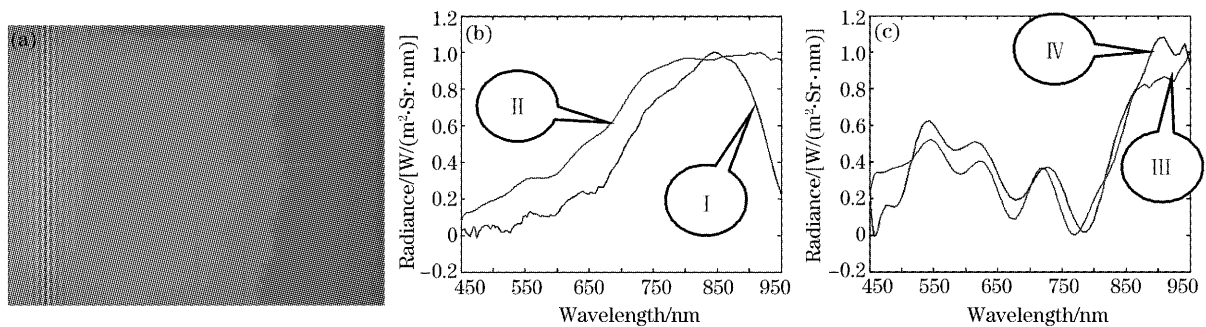


图 4 实验结果

Fig. 4 Results of radiometric calibration

表 1 误差分析

Table 1 Analyses of the error

Error term	Error / %
Instrument of spectrum detecting	5
Uniformity of light	0.6
Stabilization of light	0.2
Stabilization of electronics	1
Performance of CCD	1
Scatter light	1
Polarization	0.5
Data processing	2
Total error	5.74

4 结 论

空间调制干涉光谱成像仪因具有高通量和多通道的优点,应用前景十分广泛。未经定标的干涉成像光谱仪几乎没有应用价值,因为光谱信息必须准确量化。因此,不完善的空间调制干涉光谱成像仪的定标受到人们的广泛关注。

本文从空间调制干涉光谱成像仪的原理出发,采用一种实时比对的光谱辐射度定标方法,得到一套定标系数,较好地达到对仪器进行定标的目的,定

标精度达到 5.74%。

结果表明,此方法可以满足空间调制干涉光谱成像仪光谱辐射度定标的要求,定标后的干涉光谱成像仪能够较真实地反映地物目标的信息,为空间调制干涉光谱成像仪工程化打下基础。

参 考 文 献

- 1 Randall B. Smith. Introduction to Hyperspectral Imaging[J]. http://www.microimages.com/getstart/pdf_new/hyprspec.pdf. 1~24
- 2 E. O' Mongain, S. Danaher, D. Buckton *et al.*. Definition of the calibration requirements for an imaging spectrometer system [C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1938**: 88~99
- 3 Edward M. Granger. A calibration method for radiometric and wavelength calibration of a spectrometers [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3648**: 237~241
- 4 P. Strobl, A. Mueller, D. Schlaepfer *et al.*. Laboratory calibration and in-flight validation of the digital air-borne imaging spectrometer DASI 7915 [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3071**: 225~236
- 5 Gregg Vane, Thomas G. Chrien, Edward A. Miller *et al.*. Spectral and radiometric calibration of the airborne visible/infrared imaging spectrometer [C]. *Proc. SPIE*, 1987, **834**: 91~105
- 6 Andre Villemaire, Martin Chamberland, Jean Giroux *et al.*. Radiometric calibration of FT-IR remote sensing instrument [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3082**: 83~91
- 7 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22 (in Chinese)
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
- 8 Xiangli Bin, Ji Zhongying, Huang Min *et al.*. On the calibration of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 850~853 (in Chinese)
相里斌, 计忠瑛, 黄旻等. 空间调制干涉光谱像仪定标技术研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 850~853
- 9 Cui Yan, Li Xia, Huang Min *et al.*. Sampling theory of spatially modulated imaging interferometer [C]. *The Fourth Conference of High Technology of Navigation*, 2004. 98~102 (in Chinese)
崔 燕, 李 霞, 黄 旻等. 空间调制型干涉成像光谱仪采样方式探究 [C]. 国家高技术航天航空高技术领域第四届青年学术研讨会, 2004. 98~102
- 10 Avishai Ben-David, Agustin Ifarraguerrri. Computation of a spectrum from a single-beam Fourier-transform infrared interferogram [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1181~1189