

空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究

相里斌 计忠瑛 黄旻 王忠厚 袁艳

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要 根据光谱成像仪对定标内容的要求, 结合空间调制干涉光谱成像仪的原理和特点, 介绍一种空间调制干涉光谱成像仪实验室与飞行定标方法, 利用此方法可以满足空间调制型干涉光谱成像仪的定标要求。

关键词 光谱成像; Fourier 变换; 定标

中图分类号 TP731 **文献标识码** A

0 引言

光谱成像仪能够获取目标的影像信息和光谱信息, 形成数据立方体。由于成像过程多种因素的影响, 原始的光谱成像数据仅能十分粗略地反映目标的辐射和光谱特征, 要得到能够比较真实反映目标特征的数据立方体, 必须对光谱成像仪进行辐射度和光谱定标。

采用不同分光原理的光谱成像仪, 定标方法也不同, 但定标内容和要求是相似的^[1-4]。

空间调制干涉光谱成像仪(又称空间调制成像傅里叶变换光谱仪 SMIFTS)是1990年前后发展起来的一种新型光谱成像技术, 由于其原理优越、性能稳定, 在提出后不到十年时间, 已从原理研究发展到卫星搭载应用^[5]。

虽然空间调制干涉光谱成像仪在较短的时间里取得了快速的发展, 但其定标技术却并不完善。本文提出一种光谱辐射定标方法, 能够提高空间调制干涉光谱成像仪遥感数据的准确性。

1 光谱成像仪的定标

1.1 内容与定义

定标^[6]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性目标的响应。光谱成像仪的定标主要有辐射定标和光谱定标两类。

辐射定标就是在有效测量范围内确定光谱成像仪的响应值, 即输出电平与输入功率之比。辐射定标又分为绝对辐射定标和相对辐射定标。绝对辐射定标的目的是得到目标辐射的绝对值; 相对辐射定标的目的是得到目标中某一点辐射与其它点辐射的相对数值。

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, 通常也称为光谱响应, 其主要目的是确定探测器各像元不同光谱通道中心波长的位置、确定光谱分辨率。

光谱成像仪定标通常有两个阶段, 即实验室定标和飞行定标。仪器在发射前要在实验室进行定标, 考虑到在工作中性能有可能发生变化, 还需进行飞行定标。

1.2 色散光谱成像仪定标方法

1.2.1 光谱定标

色散光谱成像仪的光谱定标系统如图1^[7]。利用高分辨率单色仪确定各光谱通道的中心波长位置和谱线半高宽, 需要一个能够充满视场和口径、单色性好、分布均匀的光源。

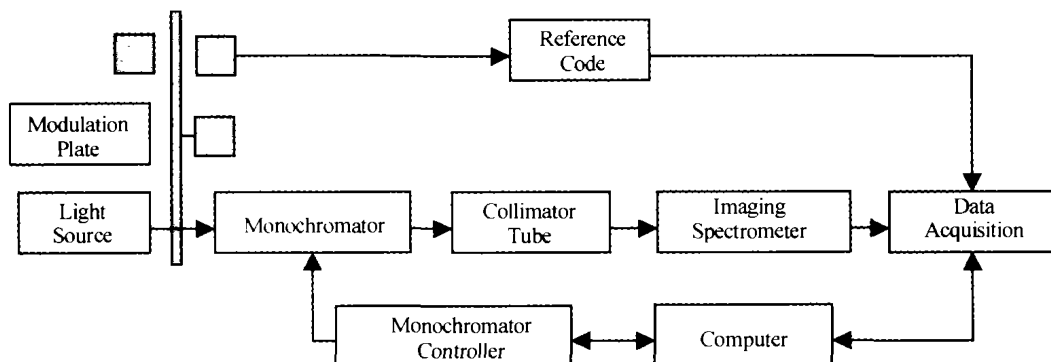


图1 色散型光谱成像仪光谱定标方法

Fig. 1 Spectral calibration of dispersive spectral imager

1.2.2 辐射定标

辐射定标^[7]的关键是建立一套高精度、高稳定

度的标准辐射源. 在地面定标时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, 积分球的输出辐亮度曲线 $L(\lambda)$ 通过精确辐射标准传递, 并具有多级绝对辐射量.

定标时首先根据光谱成像仪动态范围, 选择不同的积分球出射能量级, 测量积分球出口处的辐亮度曲线 $L_j(\lambda)$, j 为能量级. 并测量光谱成像仪不同光谱通道的响应值 DN_{ji} , i 为光谱通道标号. 由式

$$DN_i = K_i L(\lambda_i) + B_i \quad (1)$$

确定系统各通道的辐射响应函数. 式中 λ_i 为第 i 个通道的中心波长, B_i 是通道的零输入响应. 对不同 j 测得多组 DN 值, 通过线性拟合即可求得 K_i 和 B_i .

2 空间调制干涉光谱成像仪

空间调制干涉光谱成像仪 SMIFTS^[8] 的光学系统是在一个光学成像系统中加入横向剪切干涉仪实现的. 它由前置物镜、横向剪切干涉仪、准直成像镜和 CCD 信号采集处理系统等部分组成.

目标辐射首先被前置物镜会聚于焦面, 在焦面处放置一个垂直纸面的狭缝, 光束通过狭缝后, 进入横向剪切干涉仪, 狭缝被沿垂直于光轴的方向剪切成两个虚像, 然后进入准直成像镜组, 准直成像镜把已经带有相位差的两束光成像到探测器上, 相遇干涉. 干涉光谱成像仪的光学系统原理见图 2.

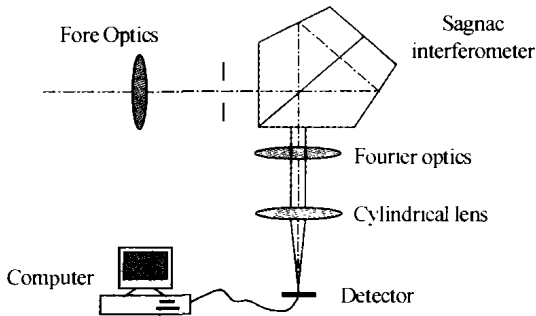


图 2 SMIFTS 光学系统原理

Fig. 2 Optical principle schematic of SMIFTS

通过理论分析可以得到, SMIFTS 的输出信号是 (略去常数)

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \text{sinc}\left(\nu \frac{bks}{f}\right) B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu \quad (2)$$

式中, $I(x)$ 是干涉图, x 是光程差, sinc 函数是由于矩形函数采样产生的调制函数, $B(\nu)$ 是入射光谱分布, b 是横切干涉仪的剪切量, k 是探测器像元占空比, s 是像元大小, f 是傅氏镜的焦距.

可见, 干涉光谱成像仪探测器接收的信号与色散光谱成像仪不同, 前者各个像元接收到的都是全谱段辐射信号的综合, 而后者不同探测器行接收到的是不同光谱通道的辐射. 因此, 两者的定标方法

也不同.

3 SMIFTS 定标理论研究

3.1 实验室定标

3.1.1 光谱定标

光谱定标的主要目的是为了确定谱线的准确位置和分辨率, 在干涉光谱成像仪中, 相应地就是确定干涉图的最大光程差和频率, 依靠单色平行光管或单色积分球实现.

对波数为 ν 的单色光来说, 其干涉图为

$$I(x) = B(\nu) \cos(2\pi\nu x) \quad (3)$$

显然, 测量 $I(x)$ 的频率就可以得到波数位置 ν . 另一方面, 干涉图最大光程差与光谱分辨率的关系为

$$\delta\nu = 1/2L \quad (4)$$

式中 $\delta\nu$ 是波数分辨间隔, L 为最大光程差. 波数分辨间隔与波长分辨率之间的关系为

$$\delta\sigma = \delta\lambda\sigma/\lambda \quad (5)$$

因此, 测得干涉图最大光程差, 就可以确定光谱分辨率.

3.1.2 辐射定标

对于干涉光谱成像仪来说, 由于探测器各像元接收到的是目标全谱段的综合信号, 同时, 它还要获得精确的光谱信息, 因此, 干涉光谱成像仪的辐射定标需要标定各个像元在不同光谱通道的辐射响应, 即一个像元点要标定出一条光谱辐射响应曲线. 而色散型光谱成像仪只需标定某一行像元在某一个光谱通道的辐射响应即可. 由此可见, 干涉光谱成像仪的辐射定标更复杂, 复原修正运算量也更大. 理论上讲, 干涉光谱成像仪定标后的输出为

$$I_{i,j}(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} R_{i,j}(\nu) \text{sinc}\left(\nu \frac{bks}{f}\right) B(\nu) \cdot \cos(2\pi\nu x) d\nu + DI_{i,j} \quad (6)$$

式中 i 和 j 代表探测器第 i 行、第 j 列, $R_{i,j}(\nu)$ 是探测器单元 (i, j) 的光谱辐射响应曲线, $DI_{i,j}$ 是 (i, j) 单元为零输入响应.

实际上, 如果探测器各像元之间的光谱辐射响应比较一致, 干涉光谱成像仪的辐射定标方法可以大大简化. 这时, 干涉图表达式简化为

$$I_{i,j}(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A(i, j) R(\nu) \text{sinc}\left(\nu \frac{bks}{f}\right) B(\nu) \cdot \cos(2\pi\nu x) d\nu + DI_{i,j} \quad (7)$$

式中 $A(i, j)$ 是探测器单元 (i, j) 的全谱段辐射度相应, $R(\nu)$ 是探测器的平均光谱响应.

采用辐射度和中心波长已知的单色积分球或辐射度与光谱曲线已知的全色积分球可实现辐射度定

标. 在消除零输入响应以及基线误差、相位误差之后, 对式(6)进行逆傅里叶变换, 可以得到复原光谱.

图3是一种实验室定标系统原理. 标准光源、单色仪、积分球以及聚光镜组成单色积分球系统, 为保证光谱定标的要求, 在定标前需对标准光源、单色仪和功率计进行预标定. 由单色积分球出口处辐射的是均匀、稳定的单色光. 影响光辐射稳定性的主要因素是电源的稳定性和环境温度的影响.

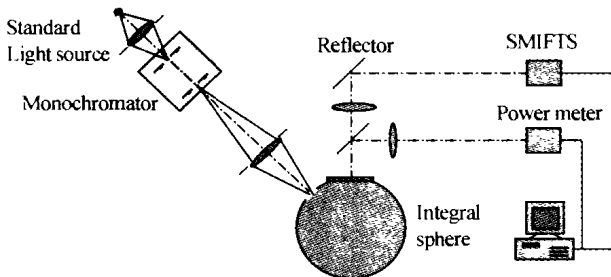


图3 SMIFTS 实验室定标原理
Fig.3 Lab calibration of SMIFTS

考虑仪器的动态范围, 一般要求积分球的辐亮度要可调. 针对 SMIFTS 的特点, 调整入射狭缝的宽度不影响干涉图, 同样能够改变探测器接收的能量大小, 这样就不必改变积分球光源的辐射强度而

只需调整入射狭缝宽度即可. 这种方法控制精度高、调整范围大、简单可靠.

4 飞行定标

空间光学遥感器由于光学表面在空间环境下受到污染、探测器及电子元器件的老化、探测器工作温度的变化、系统受到振动与冲击、光机系统结构变形等原因, 其输出性能通常发生变化. 为了准确地获得探测目标的光谱图像, 就必须在实验室定标的基础上, 与飞行辐射定标相结合, 同时考虑地面辐射场定标, 修正由大气传输过程等环节引起的误差.

本文介绍的飞行定标方法, 采用经过实验室定标设备标定的辐射光源(或引入太阳光), 在光谱成像仪一次像面的边视场入射, 在探测器边缘的几行将得到标准干涉图. 若在入射狭缝两端分别设置一个单色光源和一个全谱光源, 单色光源用来确定干涉图频率, 从而标定仪器的光谱位置和分辨率, 全谱光源用来标定仪器的辐射度响应和零光程差位置. 狭缝与探测器之间的关系如图4所示.

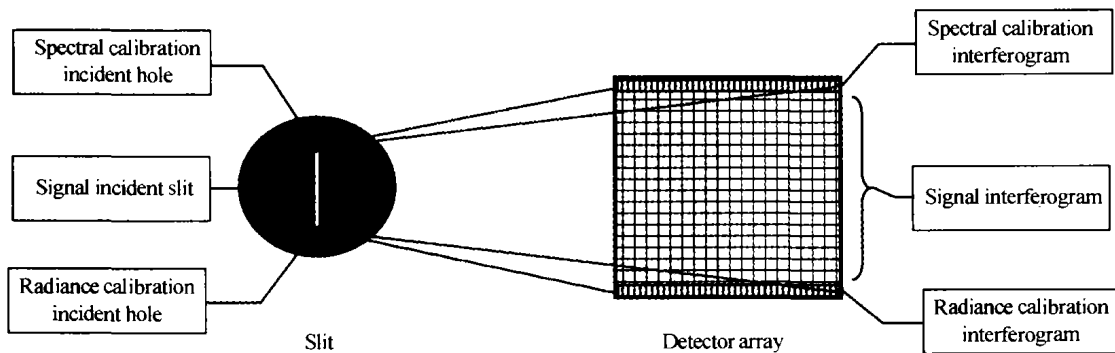


图4 飞行光谱辐射度定标方法
Fig.4 On-board spectral and radiometric calibration

由于 SMIFTS 入射狭缝的位置、形状和大小对光谱没有影响, 因此, 可以适当加大定标通光孔, 这样能够降低对定标光源功率的要求. 入射狭缝位置可以在一次像面上任意选取, 有利于系统的优化设计.

采用这种方法定标的一幅原始干涉图, 其上下两边的若干行上记载着定标数据, 可以方便地进行光谱和辐射度修正.

5 结论

通过对光谱成像仪定标内容、方法的研究, 针对空间调制干涉光谱成像仪的原理和特点, 提出了地面辐射与光谱定标的一种方法和实现途径, 同时, 还提出了一种星上定标的简易方法, 通过研究, 该方法可以满足空间调制干涉光谱成像仪的定标要求.

参考文献

- 1 Mongain E O', Danaher S, Buckton D, et al. Definition of the calibration requirements for an imaging spectrometer system. *SPIE*, 1993, **1938**: 88 ~ 99
- 2 Werij H, Kruizinga B, Olij C, et al. Calibration aspects of remote sensing spaceborne spectrometers. *SPIE*, 1996, **2820**: 126 ~ 137
- 3 Granger E M. A Calibration method for radiometric and wavelength calibration of a spectrometer. *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 DAIS 7915. *SPIE*, 1997, **3071**: 225 ~ 236
- 5 Yarbrough S, Otten L J, et al. MightySat II. 1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance. *Proc SPIE*, 2002, **4480**: 186 ~ 197

- 6 陈述彭. 遥感大辞典. 北京:科学出版社,1990. 136
Chen S P. Remote sensing thesaurus. Beijing: Science Press, 1990. 136
- 7 刘银年,薛永祺,沈鸣明,等. 实用模块化成像光谱仪(OMIS)定标. 成像光谱技术与应用会议文集,温州, 2002
Liu Y N, Xue Y Q, Shen M M, *et al.* *Spectral Imaging Technique and Application Conference Corpus*. Wenzhou, 2002
- 8 相里斌,赵葆常,薛鸣球. 空间调制干涉光谱成像技术. 光学学报,1998,18(1):18~22
Xiangli B, Zhao B C, Xue M Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(1):18~22

On the Calibration of the Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer

Xiangli Bin, Ji Zhongying, Huang Min, Wang Zhonghou, Yuan Yan

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

Received date:2003-09-24

Abstract The radiometric and spectral calibration requirements of the imaging spectrometers is described. On the basis of the discussion of the principle and characteristics of the spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer (SMIFTS), a novel calibration method is introduced. Both schemes of the laboratory calibration and on-orbit calibration are presented.

Keywords Spectral imaging; Fourier transform; Calibration



Xiangli Bin born in 1967. Graduated from the University of Science and Technology of China (USTC) in 1990. Received the Ph. D. degree of optics in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics(XIOPM) in 1995. He has been the director of XIOPM from 1999. He is also the head of 863-708 expert group and the head of department of precision mechanics and instrument of USTC. His present interests are on remote sensing and Fourier transform spectroscopy. He has published more than 70 papers.