HyMap-C机载高光谱仪定标方法与结果评价

韩亚超[1],高子弘[1],杨达昌[1],于峻川[1],陈洁[1,2]
(1.中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2.中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101)

摘 要:HyMap-C机载高光谱仪能够在400~2 500 nm波长范围内获取144个精细光谱通道,对于地球表面地物特征有极强的探测能力。为保证高光谱遥感数据的可靠性与定量化分析的精度,作者分别采用单色准直光法、漫反射板定标法和内部参考标准法对HyMap-C机载高光谱仪进行了实验室光谱定标、绝对辐射定标以及飞行过程中航线上相对辐射定标。通过航空飞行测量与地面实际测量的光谱反射率数据进行对比验证,结果表明两者整体谱型与局部吸收特征非常一致,定标结果可靠,数据可信。文中阐述的定标原理与方法为我国自主研制机载高光谱仪的定标提供了依据与思路,定标后获取到的高光谱分辨率数据可广泛应用于地质调查领域特别是矿物填图中。

关键词:HyMap-C;机载高光谱;光谱定标;绝对辐射定标;航线上相对辐射定标
中图分类号:P627 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-4135(2017)03-0226-05

高光谱技术是当前遥感技术发展的热点之一,它是在多光谱遥感基础上发展起来的光谱测量技术。20世纪80年代成像光谱技术的出现,标志着光学遥感的发展进入了高光谱阶段。因高光谱技术能够在可见光、近红外和短波红外谱段范围内获取几十个甚至上百个精细光谱波段,其数据具有空间大尺度探测、光谱分辨率高、图谱合一等特征和优势,显著提高了人类对于地球表面地物特征和性质的探测能力:如杨宜通过探测器在光谱维的光谱通道展开精确反演了大气中温室气体的含量信息[1];王润生等通过对主要岩石、矿物反射光谱特征和影响因素的研究,开展了高光谱矿物填图[2];方慧等通过对油菜叶片高精度光谱变化特征的分析为农作物长势信息提取提供了思路[3],等。

航空高光谱是高光谱遥感最重要的研究手段之一,它很好的弥补了航天高光谱成本高、成像受大气层影响和空间分辨率低以及光谱分辨率低等缺点。近些年随着传感器和飞行平台的发展,航空高光谱逐渐形成了较为完善的技术方法与流程。其中高光谱遥感器的定标工作极为重要,这不仅决定着高光谱遥感数据的可靠性,更是对高光谱遥感数据进行定量化分析的前提。通过定标确定其探测单元输出数字量与其接收到的电磁波信号之间的定量关系,为不同机载高光谱仪在不同时间、不同地点测得的成像光谱数据提供统一的参照。高光谱仪的定标主要包含航空数据获取飞行前的实验室光谱定标和绝对辐射定标,以及飞行过程中航线上定标[4-8]。在轨(航线上)定标方面,国内航天(星载)高光谱仪有很大的进展,实现了我国风云二号(FY-2)卫星在轨辐射定标技术的重大突破[9];而航空(机载)高光谱仪在飞行过程中的相对辐射定标则鲜有报道。

本文依托于澳大利亚HyVista公司投入商业性运营世界先进的实用型航空(机载)高光谱成像系统HyMap-C,阐述了其实验室内光谱定标和绝对辐射定标的原理与方法,介绍了其飞行过程中航线上相对辐射定标的思路,验证并评价了定标结果。

1 HyMap-C概述

机载高光谱仪的发展是高光谱遥感技术发展的重要组成部分,其中澳大利亚HyMap系列机载高光谱仪因其在地质勘探领域特别是矿物填图方面的优势而受到广泛关注[2,10-11]。HyMap-C为该系列产品的最新型号,它是色散型成像光谱仪,利用光栅对观测目标的光谱进行分光,采用线阵列探测器进行数据

收稿日期:2017-04-06
资助项目:中国地质调查“天山-北山重要成矿区带遥感调查(121201003000150008)”;“高光谱地质调查方法技术研究(1212031513012)”
作者简介:韩亚超(1988-),男,工程师,2013年毕业于中国地质大学(北京),长期从事航空遥感测量与遥感地质应用研究,Email:yachao.han@qq.com。

采集,通过扫摆的方式获取图像和光谱。它的波长范围为400～2 500 nm,共有144个光谱波段;瞬时视场角2.5 mrad,视场角60°;在太阳天顶角为30°和地物反照率为50%的观测条件下,可见光-近红外平均信噪比大于1 000/1,短波红外平均信噪比大于600/1。在航空遥感作业飞行时配有高精度的GPS导航定位系统并集成了IMU/DGPS(Novatel/SPAN SE)定位和姿态参数记录系统;自动稳定平台采用Leica公司生产的高性能PAV80三轴陀螺稳定平台,能实时修正飞行数据获取过程中影像数据的俯仰角、侧滚角和偏流角;同时还配备先进的数据预处理系统。可根据飞行获取的姿态参数和大气参数,实现对图像的几何校正和大气校正。

2 实验室定标

2.1 光谱定标

光谱定标的意义是用来检验成像光谱仪的各光谱参数,确定机载高光谱仪各光谱通道的中心波长位置和光谱带宽,是辐射定标的前提和保证。最常用的光谱定标方法有标准谱线灯方法和单色准直光方法。其中谱线灯方法结构简单、容易操作,但是只能获取中心波长而无法标定带宽;HyMap-C机载高光谱仪采用的是单色准直光方法,通过单色仪输出得到连续的光谱测试曲线,具有定标精度高、全波段定标及适用范围广等优点,实现对机载高光谱仪各通道的中心波长和带宽的标定。其光谱响应函数可表示为以下形式(公式1):

$$f(\lambda-\lambda_j)=\exp\left[-4\ln 2\frac{(\lambda-\lambda_j)^2}{\Delta\lambda^2}\right] \quad (1)$$

其中,Δλ为光谱响应函数的半峰值全宽,由于光栅的色散可近似看成线性,使用光栅作为色散元件可认为是均匀采样,各个光谱通道Δλ是一个定值。

HyMap-C实验室光谱定标可分为单色仪定标和探测器定标两个部分。

(1)单色仪定标:在对机载高光谱仪探测器定标之前,需要对单色仪进行定标(图1),目的是为了校正单色仪因时间和环境等(如在移动过程中碰撞或震动等)造成单色光波长漂移等光谱特性的改变。实验室中使用光谱带宽小于成像光谱仪光谱带宽1/10的单色仪对成像光谱仪进行光谱定标。单色仪可输出特定波长的单色光得到每个光谱通道的光谱响应,将得到的数据点做高斯曲线拟合,相对最大值作归一化处理,该高斯曲线的峰值波长为对应像元的中心波长,半高宽为光谱带宽,相邻中心波长的宽度即为光谱采样间隔。实验室采用的单色仪为NewPort公司生产的MS257(型号M77781A)光栅单色仪。选用连续光谱中的640.22 nm、724.52 nm和1 449.04 nm三个波谱峰值作为标准值,分别对单色仪的光栅进行定标,扫描间隔为0.2 nm。通过软件测量显示,单色仪定标的结果误差小于0.1 nm。

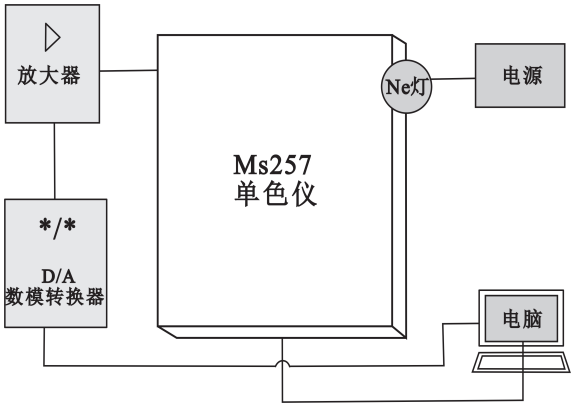

图1 MS257光栅单色仪定标示意图

Fig.1 General view of calibration of the monochromator

(2)探测器定标:HyMap-C探测器定标装置主要由单色仪、照明光源和平行光管构成(图2)。在安装过程中,需精确调整平行光管的位置,使HyMap-C探测器狭缝接收到最大的通光量。这一过程必须严格执行,否则它会影响探测器测试数据的信噪比属性。光谱定标数据获取时的光谱扫描间隔为2 nm,狭缝宽度500 nm,分别对成像光谱仪的可见光(VIS)、近红外(NIR)、短波红外1(SWIR1)和短波红外2(SWIR2)共四个探测器、144个光谱通道进行光谱定标数据的获取。其中可见光谱段的前8个波段噪声过大,需设置更优采样间隔进行重新测量,予以替换。

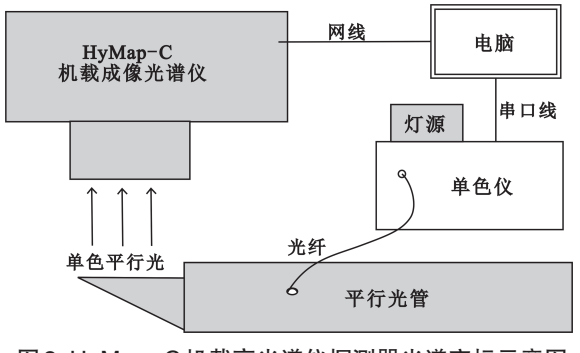

图2 HyMap-C机载高光谱仪探测器光谱定标示意图

Fig.2 General view of the detector spectral calibration of the HyMap-C

再通过波段数据解算,输出每个波段的中心波长位置和带宽,上传至HyMap-C主机,完成光谱定标。

2.2 绝对辐射定标

辐射定标的意义是确定成像光谱仪各通道的响应并评估不确定度,同时检测其响应的衰变并进行响应均匀性校正。机载高光谱仪的辐射定标就是指建立每个探测元所输出信号的DN值与该探测器对应像元内的实际地物辐射亮度值之间的定量关系。利用辐射参考标准,通过遥感仪器对辐射参考标准的观测,将遥感仪器输出图谱数据同遥感器接收的入瞳辐射亮度L(λ)之间的换算关系通常设计为线性(公式2),即:

$$Rad(\lambda_{i,j})=a+bDN(\lambda_{i,j}) \quad (2)$$

式中a、b为辐射定标系数,a为机载高光谱仪暗偏置,亦即没有信号输入时机载高光谱仪采集到的信号值。$Rad(\lambda_{i,j})$为机载高光谱仪第i行、第j个探测器像元对应的光谱辐亮度;$DN(\lambda_{i,j})$为机载高光谱仪第i行、第j个探测器像元输出的数值。辐射定标就是测定出每个探测像元的a、b值,若实际测得每一个$DN(\lambda_{i,j})$数值,通过计算可得到相应的$Rad(\lambda_{i,j})$数值。

HyMap-C实验室辐射定标方法选用辐照度标准灯作为辐射计量标准的漫反射板定标法,辐射定标中使用的主要设备为标准灯、漫反射板及相关软件。如图3,将标准灯固定至垂直于漫反射板中心延长线处,漫反射板置于探测器下方并成45°角以保证探测器获得最大的通光量;再将探测器与漫反射板共同放置于黑盒空间内,并关掉实验室内其他灯光,消除标准灯以外的光源的影响。然后进行辐射定标数据的采集,依次为:扫描镜两个反射镜的DN值、HyMap-C的内部标准灯的DN值和内部标准板的DN值。上述测试过程中,HyMap-C会自动进行暗电流测试,测得的数据已扣除了暗电流。辐射定标中使用的标准灯功率为876.9瓦、电流8安培、电压109.61伏特,电流电压高度稳定;标准灯到漫反射板的垂直距离为660 mm。最后通过数据解算,得出HyMap-C机载高光谱仪输出光谱数据到物理量的转换的辐射定标系数。

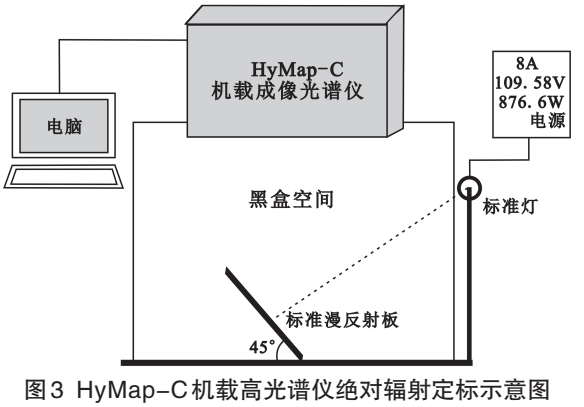

图3 HyMap-C机载高光谱仪绝对辐射定标示意图

Fig.3 General view of absolute radiometric calibration of the HyMap-C

3 航线上相对辐射定标

在实际航空高光谱数据获取飞行中,飞行平台的加速和颠簸等机械振动可能会导致光学元件间的距离发生微小的改变,或者不同环境下的气压、温度和湿度等会引起小幅度辐射度的变化,这都将影响到高光谱数据的精度与可信度,所以飞行过程中航线上的相对辐射定标是非常必要的。

HyMap-C在航线上相对辐射定标方法采用内部参考标准法:其内部定标系统由内部标准灯、内部标准板构成,在进测线和出测线时各有30秒左右的时间对当前环境下的内部标准灯、内标准板和暗电流各DN值进行测量和标定,用航线上测定的内标准灯的平均值减去暗电流的平均值就得到飞行时的校正参数$Dy\,cal_{flight}$。通过公式3的计算,从而完成各条航带数据航线上的相对辐射定标。

$$Rad_i = DN_i \times \left(\frac{Dy\,cal_{lab}}{Dy\,cal_{flight}} \times RC_{lab} \right) \quad (3)$$

式中:Rad_i为波段i的辐亮度值,该值经过校正(去除暗电流、内部散射、帧转换损失、电子偏置);DN_i为探测器波段i的像元灰度值;$Dy\,cal_{lab}$为实验室环境下HyMap-C得到的定标校正参数;RC_{lab}为实验室绝对辐射定标得到的DN值转辐射亮度的系数。

在内部参考标准法中,内部标准板由特别的材料制成,每次获取数据时其辐射亮度值是稳定的,这可以作为检验航线上相对辐射定标结果是否可靠的依据。另外,内标准板还可以提供HyMap-C探测器在内部标准灯能量照射下各谱段的吸收特征,用来检验是否存在光谱漂移。

4 定标结果与评价

(1)实验室定标结果:光谱定标的结果(图4a)显示其可见光、近红外、短波红外-1和短波红外-2四个谱段的带宽平均值分别为13.13 nm、14.12 nm、15.48

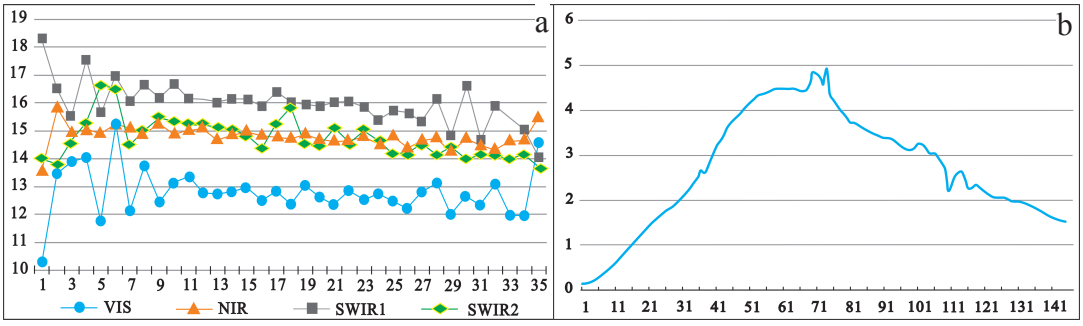

图4 实验室定标结果(横轴为波段序号)

Fig.4 Result of calibration in laboratory

a.光谱定标采样间隔(纵轴单位为nm);b.辐射定标系数

nm、13.81 nm,光谱采样间隔平均值分别为12.78 nm、14.77 nm、15.97 nm、14.73 nm;每个谱段的波段数为36,波段总数为144个。其中个别波段的带宽与采样间隔略大,但均位于探测器谱段相应范围的两侧,对于仪器的应用没有影响;绝对辐射定标系数如图4b所示。

(2)航线上相对辐射定标结果:如图5所示,选取2016年6月27日飞行架次共16组内标准板的辐射亮度值为例,与飞行前2016年6月7日实验室内绝对辐射定标得出的内标准板辐射亮度值进行对比,其结果完全一致,表明航线上相对辐射定标结果可信,仪器稳定。此外笔者统计了大量飞行时航线上相对定标数据,结果表明辐射定标误差小于5%。

(3)反射率数据评价:HyMap-C机载高光谱仪在2016年6~8月份在甘肃执行中国地质调查局"天山-北山重要成矿区带遥感调查"项目,调查区位于甘肃北山营毛沱-玉石山地区铁铜金钨多金属矿整装勘查区内,区内岩浆热液矿床发育且成矿类型丰富,还产有较多沉积变质型矿床,成矿条件优越,找矿潜力很大。在航空高光谱数据获取期间进行了同步地面光谱测量,测量仪器采用中国国土资源航空物探遥感中心的便携式光谱辐射计(ASD光谱仪(6523))。航空高光谱数据经几何校正、辐射校正、大气校正、二向反射纠正、镶嵌和拼接后,选取影像上与地面同步测量的同一点位进行反射率曲线的对比(图6),两条光谱曲线的整体谱型与局部吸收特征均十分吻合:波长450 nm至650 nm之间曲线斜率具有一致明显变大的趋势,波长750 nm至1 200 nm之间存在弱吸收谷,波长900 nm处可识别出宽缓而非对称的吸收特征,以上特征表明该物质中含有三价铁矿物成分,与实地勘察结果相符。光谱上的一致性表明HyMap-C高光谱仪实验室内定标可靠,并经航线上相对辐射定标,准确的获取了地物光谱的真实信息。

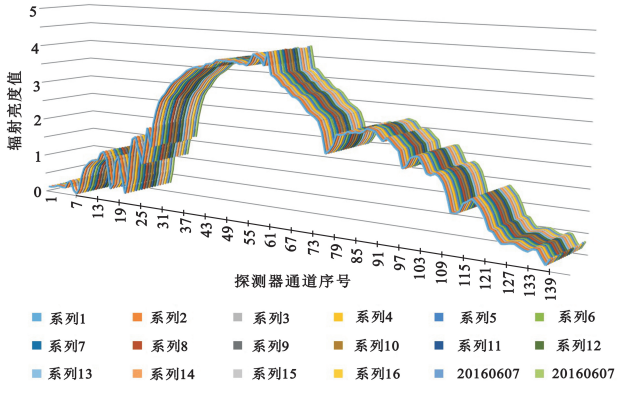

图5 航线上与实验室内内标准版辐射亮度值对比

Fig.5 Comparison of radiance values of internal standard boardbetween during flying and in laboratory

5 结论

(1)HyMap-C机载高光谱仪本次定标结果显示,其光谱采样间隔可见光谱段优于13 nm,近红外-短波红外谱段优于16 nm;航空遥感飞行作业时的辐射定标误差小于5%。

(2)本文介绍了HyMap-C机载高光谱仪的实验室光谱定标、绝对辐射定标以及航线上相对辐射定标的原理和方法,这为我国自主研制机载高光谱仪定标,尤其是航线上相对辐射定标提供了思路与借鉴。

(3)通过对HyMap-C机载高光谱仪定标后的航空飞行测量的高光谱数据与地面同步测量的光谱结果进行对比验证,二者光谱反射率曲线特征一致,表明HyMap-C准确地获取了地物的光谱信息。这为我国高光谱地质学家们提供了大量详实的数据,也为地质调查领域、尤其是矿物填图方面提供了更为丰富的技术手段。

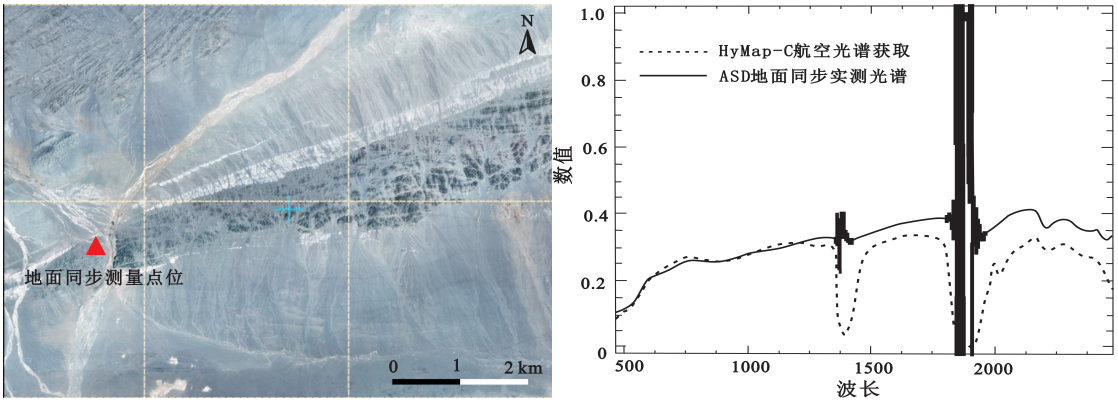

图6 航空高光谱影像与地面实测光谱反射率对比

Fig.6 Comparison of spectral reflectance between aerial hyperspectral image and ground actual measurement

a.航空高光谱影像与观测点位置;b.光谱反射率对比

参考文献:

[1] 杨宜.成像光谱仪光谱定标技术[J].红外,2006,27(8):24–26.

[2] 王润生,甘甫平,闫柏琨,等.高光谱矿物填图技术与应用研究[J].国土资源遥感,2010,01:1–13.

[3] 方慧,宋海燕,曹芳,等.油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(9):173–1734.

[4] 崔敦杰.成像光谱仪的定标[J].遥感技术与应用,1996,11(3):56–64.

[5] 金辉,姜会林,郑玉权,等.高光谱遥感器的光谱定标[J].发光学报,2013,34(2):235–239.

[6] 刘倩倩,郑玉权.超高分辨率光谱定标技术发展概况[J].中国光学,2012,5(6):566–577.

[7] 王立朋.机载高光谱仪辐射定标概览[J].光机电信息,2011,28(12):73–77.

[8] 张春雷.成像光谱仪光谱辐射定标新方法研究[D].中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2011.

[9] 郭强,陈博洋,张勇,等.风云二号卫星在轨辐射定标技术进展[J].气象科技进展,2013,3(6):6–12.

[10] 李志忠,汪大明,刘德长,等.高光谱遥感技术及资源勘查应用进展[J].地球科学—中国地质大学学报,2015,40(8):1287–1294.

[11] 王润生,熊盛青,聂洪峰,等.遥感地质勘查技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1699–1744.

Calibration method and results evaluation of HyMap–C airborne hyper–spectrometer

HAN Ya-chao[1], GAO Zi-hong[1], YANG Da-chang[1], YU Jun-chuan[1], CHEN Jie[1,2]

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The HyMap-C airborne hyper-spectrometer is capable of obtaining 144 fine spectral channels in the 400 ~ 2 500 nm wavelength range and has a strong ability to detect the features on the Earth's surface. In order to ensure the reliability of hyperspectral remote sensing data and the accuracy of quantitative analysis, the authors used the monochromatic collimation method, the diffuse reflector calibration method and the internal reference standard method to carry out the laboratory spectral calibration, absolute radiometric calibration, and relative radiation calibration during flight of the HyMap-C. The comparison of spectral reflectance data between aerial measurement and actual ground measurement shows that both the local and global absorption characteristics of the two spectral curves have strong consistency, and the calibration results and the data are reliable. The calibration principle and method proposed in this paper provide the basis and idea for the calibration of the self-developed airborne hyper-spectrometer in China. The high spectral resolution data obtained after calibration can be widely used in the field of geological survey, especially in mineral mapping.

Keywords: HyMap-C; airborne hyperspectral; spectral calibration; absolute radiometric calibration; relative radiometric calibration during the flight