

# SPOT 地面场定标与星上定标结果的比较分析\*

田庆久 郑兰芬 童庆禧

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

**摘要** 本文研究是在遥感辐射定标场选择的基础上,利用 6S 大气辐射传输模型进行 SPOT 遥感数据的定标和地物的光谱反射率反演,即在传感器飞越辐射定标场上空,在定标场选择若干像元区,测量传感器对应的各波段地物的光谱反射率和大气光谱参量,并利用大气辐射传输模型给出遥感器入瞳处各光谱带的辐射亮度,最后确定它与传感器对应输出的数字量化的数量关系,求解定标系数。然后,对相应的研究训练区的遥感数据进行大气辐射校正,进而反演训练区内的地物光谱反射率。最后,通过将反演值与实地测量的地物光谱反射率进行对比分析,来估算定标不确定度,并比较说明两种不同方式定标差异及优势和限制。

**关键词** 遥感, 定标, 反演, 反射率, 不确定度

## 1 引言

遥感定标是遥感信息定量化关键的一步,遥感数据的可靠性及应用的深度和广度在很大程度上取决于定标精度,定标精度高低是衡量光学遥感数据质量的一个重要指标,其实质就是要建立遥感器每个探测元所输出信号的数值量化值(DC)与该探测器对应像元内的实际地物辐射亮度值(Li)之间的定量关系,也就是所谓绝对辐射定标,即:  $DC = A \cdot Li$ , 式中 A 为遥感器定标系数<sup>[1]</sup>。

从光学遥感数据的定标方法上讲,可分为 3 大类:飞行前实验室定标、星上定标和地面定标<sup>[2]</sup>。光学遥感的星上定标一般采用灯定标、太阳定标和黑体定标。其优点可对一些光学遥感器实时定标,不足的是,大部分星上定标都只是部分系统和部分口径定标,没有模拟遥感器的成像状态,星上定标系统也不够稳定,影响了定标的精度。地面定标是依赖地面大面积均匀地物作为定标源,其优点在于实现了对遥感器运行状态下与获取地面图像完全相同条件的绝对校正,可以从卫星发射到遥感器失效整个过程提供校正,原则上还可以对其它空中和轨道平台遥感器进行校正。其不足之处就是需要测量和计

算遥感器过顶时的大气环境参量和地物反射率。星上定标和地面定标各有其特点。这就需要把星上定标和飞行中地面辐射场定标结合起来,以满足不同应用目的的需要。

1995 年 7 月中旬,在法国南部 La Crau(“拉拷”)辐射定标场及附近地区,进行了由法、英、中、美、意、荷、德组成的国际联合遥感试验,获取了大量的星载 SPOT、航空成像光谱遥感数据;系统的地面辐射光谱及大气、太阳参量的物理量测量也同步进行,旨在进一步开展多光谱、成像光谱遥感信息特征的提取、辐射定标、大气校正、定量化反演及地物光谱识别模型研究等。作者应邀携地物光谱仪参加了这一大型遥感试验,对 1995 年 7 月 15 日 SPOT-2 遥感数据进行了定标和地物光谱反射率反演研究,并将星上定标与地面定标结果进行对比分析。

## 2 实验区概况

La Crau 遥感辐射定标场位于法国东南部,大约 60km<sup>2</sup> 的地区,地面主要是由中小尺度的卵石和细小的杂草组成的平坦地面。该地区属干燥地中海季风气候,海拔高度约 20m。实际定标的地方是在定标场中心约 400m × 400m 的区域(N43° 36', E4° 52')。

\*国家自然科学基金委资助项目。

感谢法国农业科学院生物气候实验站(INRA)的顾行发博士和 G.Guyot 教授的支持和指导。

收稿日期:1997-05-05;收到修改稿日期:1997-10-13

该地区是一个有许多特征的遥感实验场,不论是短波段还是长波段都是如此。实验区的微小空间变化,都会引起光谱辐射反应,因而很适宜作遥感器的定标。La Crau 场附近的 Camargue 区是应用研究区,拥有各种小田块镶嵌,即有干旱的地表(茎秆或裸地),也有稻田或灌溉作物,形成明显的空间变化和辐射反差。其间还有比田块大得多的池塘,且水体清澈。该区土地利用的多样性,利于评价高空间遥感器作用,并利用倾斜观测和对遥感器性能进行对比。在该实验区选择了 4 个研究子区 A、B、C、D。A 区即为 La Crau 场的核心部分,为遥感器定标用;B 区、C 区、D 区为不同用途遥感研究区,拥有各种自然与人工地物,特别是各类农田,便于进行遥感信息应用基础分析研究。

### 3 SPOT 数据获取

1995 年 7 月 15 日 SPOT-2 对该实验区扫描成像,其数据被收集获取。SPOT-2 的 HRV 遥感器分 4 个通道(绿波段 XS1: 0.5—0.59 $\mu\text{m}$ ; 红波段 XS2: 0.61—0.68 $\mu\text{m}$ ; 近红外波段 XS3: 0.79—0.89 $\mu\text{m}$ )和全色波段(0.51—0.73 $\mu\text{m}$ ),扫描宽度为 60km,每行扫描像元为 3000 个。每次扫描时遥感器几何参数及太阳参数如下:太阳观测角  $\theta_s$ : 25.2°, 太阳方位角  $\phi_s$ : 145°; 遥感器观测角  $\theta_v$ : 3.6°, 遥感器方位角  $\phi_v$ : 102°。由原始图像提出 La Crau 场相应 HRV 3 个可见光通道的 DC\* 值为, XS1: 147.4(均方差 5); XS2: 120.9(均方差 4); XS3: 123.5(均方差 4)。

### 4 大气参数获取

为了应用 6S 模型进行大气校正,必须确定气溶胶的特性和大气各气体成分含量。以便计算气溶胶的特性(大小分布函数、光学厚度)和大气气体透过率,这依赖于地面光谱测量和大气探空数据。由于大气气体分子造成瑞利散射,它还依赖于大气气压和光谱波长。在实验区,  $\text{O}_3$  是一比较稳定的量,含量可通过 London 等人(1976)的资料查到<sup>[9]</sup>,而且精度可达到定标要求。大气水的含量是通过实验区附近的两个气象台站 Margame(定标场东南 10km 处)和 Nimes(定标场西北 40km 处)获得,从这两个相对方位的台站,可获取温度和相对湿度。相对湿度是通过实验场地面水汽密度,再通过线性插值得到的。SPOT 过境时,在 Nimes 用无线电探空仪在中午和午

夜观测,并通过地面测量和探空资料的空间线性插值可得到实验区的水汽含量。同时还利用太阳辐射计测量,利用 Langely-Plot 算法<sup>[4]</sup>,计算气溶胶、光学厚度和大气水汽含量。测量及计算结果如下:气溶胶光学厚度(550nm): 0.151;  $\alpha$ : -1.55( $\alpha$  为 Angström 公式的波长指数);水汽含量: 3.3(g/cm<sup>2</sup>)。

### 5 光谱测量

SPOT 模拟辐射计针对 SPOT 定标而设计的,它的 3 个通道的光谱范围及带宽与 SPOT 可见光 3 个通道一样。在 SPOT 过顶时,两台模拟辐射计同时在 400m × 400m 的定标区按照一定的统计规则布点进行光谱测量,每台测量约 100 次。在 SPOT 过顶时的前后半小时内,对应 SPOT 各通道的辐射亮度和辐照度分别同步测量。为了分析二向反射特性,辐射照度头和参考板的非朗伯响应及实验定标场的光学特性(光谱、空间、角度及二向反射的空间变化)进行了详细的观测,以便于对 SPOT 的星下点和偏离点进行双向反射的纠正。根据场地状况共测量 205 点;测得 La Crau 场相应 SPOT XS1 的反射率为: 14.84%(均方差为 1.60);相应 XS2 的反射率为: 21.33%(均方差为 2.23);相应 XS3 的反射率为: 30.42%(均方差为 2.16)。

用美国 GER 公司发展的野外智能红外光谱仪 MARK-V,对定标场地和实验区特征地物进行了光谱测量:在定标场测量时,采用单通道的测量方法,用与 SPOT 模拟辐射计同样的一块 50cm × 50cm 的参考板,共测量 79 个点,以便两台光谱仪进行对比,同时分析 La Crau 场在整个太阳光谱区的反射率特性(图 1)。

两台仪器对应 HRV 3 个通道的差异小于 2%,从可见光到短波红外整个太阳反射光谱区定标场反射率呈中等值(20%—40%),且光谱曲线形态无吸收峰,满足光学遥感定标的要求。在 B 研究区,对麦茬裸地、裸土地、豆地、草地、芦苇地进行了光谱测量,每个地物单元测量 20—30 次,以进行平均,减小测量误差。

### 6 SPOT 星上定标系数

为对比分析地面定标与星上定标,从 SPOT 卫星数据接收部门收集到 SPOT-2 在 1995 年 7 月 15

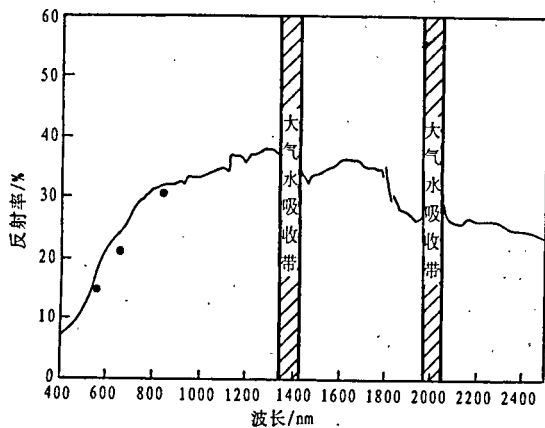


图1 La Crau辐射定标场地物光谱反射率曲线

• 为SPOT模拟辐射计测量值(HRVXS1、XS2、XS3通道)

Fig.1 The spectral reflectance curve of La Crau Site

日过顶 La Crau 场时的星上灯的定标系数  $A'$ , 相应 3 个通道分别为, XS1: 2.266; XS2: 1.725; XS3: 3.324.

### 7 6S 大气辐射传输模型

Tanfe 等人发展的 6S<sup>[5]</sup>已成为世界上发展完善的大气辐射校正模型算法之一。该模型既能较合理地处理大气散射、气体吸收,又能产生连续光谱,避免在光谱反演中的较大的定量误差,还可以利用模型中的模拟参量,确定试验区高度、遥感器高度以及其它变化。6S 充分利用了分析表达式和预选大气模式,而使计算时间很短。在该模型中,表面反射率定义为:

$$\rho^*(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda}) = \pi L(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda}) / \mu_s E_s(\lambda) \quad (1)$$

其中,  $\theta_s$  是太阳天顶角,  $\psi_s$  是太阳方位角,  $\theta_v$  是遥感器天顶角,  $\psi_v$  是遥感器方位角,  $L$  是空中遥感器测量的辐射值,  $E_s$  是大气层顶部的太阳光辐射通量,  $\mu_s = \cos\theta_s$ 。对于地面一水平朗伯面的反射率,可写为:

$$\rho^*(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda}) = T_g(\theta_s, \theta_{v,\lambda}) \times \left[ \rho_a(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda}) + \frac{T(\theta_{s,\lambda})T(\theta_{v,\lambda})\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)S(\lambda)} \right] \quad (2)$$

(2)式中,  $T_g$  是太阳—地面—遥感器路径上气体的总透过率。  $\rho_a$  是大气反射率,它与大气散射程辐射有关。  $T(\theta_s)$  是向下散射透过率,  $T(\theta_v)$  是向上散射透过率,  $S$  是大气反照比,  $\rho$  是地面目标反射率。由 (2)式,可求得:

$$\rho(\lambda) = \left[ \frac{\rho^*(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \theta_{v,\lambda})}{T_g(\theta_s, \theta_{v,\lambda})} - \rho_a(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda}) \right] \times \left[ T(\theta_{s,\lambda})T(\theta_{v,\lambda}) + S(\lambda) \left( \frac{\rho^*(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda})}{T_g(\theta_s, \theta_{v,\lambda})} - \rho_a(\theta_s, \psi_s, \theta_v, \psi_{v,\lambda}) \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

### 8 计算与分析

整个研究技术方案流程如图 2。依照 6S 模型,将 SPOT 卫星在定标场上空过顶时的几何参数和大气参数,以及定标场的地面反射率组成对应 SPOT 各通道的 6S 输入文件,计算定标场相应 HRV 各通道的入瞳处的表观辐射亮度值  $L_i$ (表 1),并与定标场的  $DC^*$  相比较,由  $DC^* = A \cdot L_i$ , 计算各通道定标系数  $A$ ; 再与星上定标系数  $A'$  进行对比分析(图 3),同时将星上灯定标辐射场的表观辐亮度与 6S 模型计算的地面定标结果进行比较分析(图 4)。利用表 1 中的输出文件参量和公式 (3),通过 ENVI 图像处理软件的“BAND MATH”功能实现 SPOT 图像数

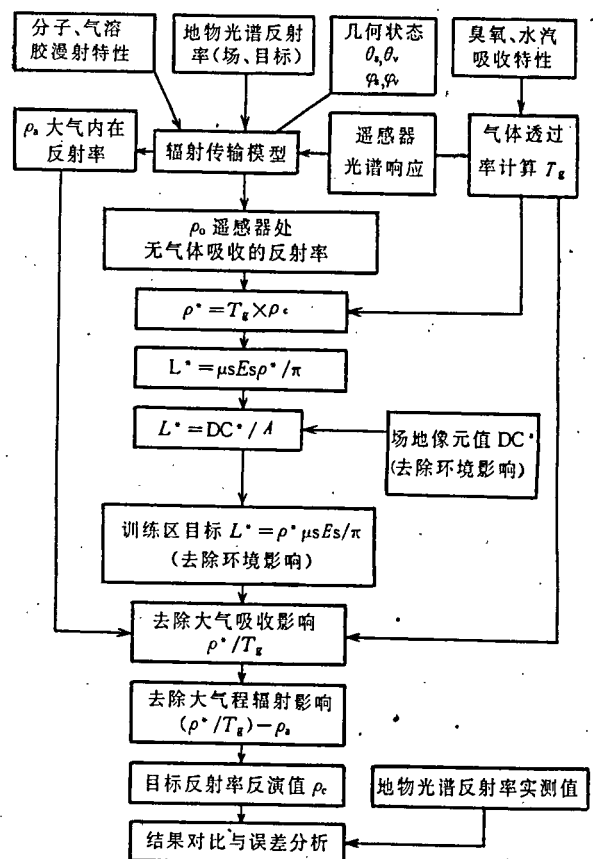


图2 研究技术方案流程框图

Fig.2 Research scheme flow chart

表1 6S模型输出文件主要参量  
Table 1 Main output parameters calculated by 6S

6S输出主要参量	XS1	XS2	XS3
$\rho^*$	0.143	0.185	0.258
$L$	73.743	81.809	75.187
$\tau_g$	0.936	0.935	0.928
$\rho_a$	0.038	0.020	0.009
$\rho_{oc}$	0.010	0.011	0.010
$L_a$	19.558	8.979	2.564
$L_c$	5.161	4.767	2.874
$\tau_s$	0.858	0.898	0.931
$\tau_r$	0.871	0.908	0.938
$S(\lambda)$	0.074	0.048	0.026

据的反射率转换,最后提取 SPOT 图像数据相应各典型地物的反射率(表 2)。分析以上数据和处理结果,可看出:

(1)由图 2, SPOT HRV 3 个通道的地面定标系数都小于星上定标系数,差值( $|A - A'|$ )分别为:0.266;0.247;1.681。由此,星上定标反演的地面定标

场辐射亮度比地面定标结果都小(图 3),尤其第 3 通道。其相应 HRV 3 个通道差值分别为(单位:  $W / m^2 \cdot \mu m \cdot Sr$ ): 8.695; 11.71; 38.03。

(2)由表 2 知,星上定标和地面定标而反演的畜牧草地、豆地、稀疏灌丛地、裸土地反射率与实际测量结果(对应 HRV XS1、XS2、XS3 通道)都有差异,说明两种定标方法都有系统误差,并反映出星上定标比地面定标的不确定度大。

(3)根据以上 4 个地物单元的反演反射率与实际测量的反射率差异,可以估算各定标方法的不确定度。其方法是,相应 HRV XS1、XS2、XS3 通道,将 4 个地物单元反演反射率值与实测值比较,按照  $(|\rho_{反演} - \rho_{实测}| / \rho_{实测})$  对相应各地物单元求不确定度,再对相应 4 种地区物单元的不确定度取平均。求得星上定标的不确定度为, XS1: 14.54%; XS2: 14.09%; XS3: 27.50%; 地面定标不确定度为, XS1: 8.44%; XS2: 7.60%; XS3: 8.39%。为 SPOT 进行地面场定标的法国农业科学院生物气候实验站曾系统地研究过,基于 La Crau 定标场, SPOT 地面

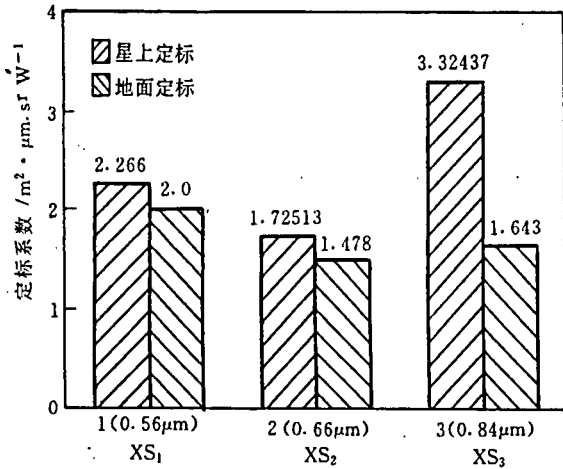


图3 地面定标与星上定标系数的比较

Fig.3 Comparison of calibration coefficients of ground calibration and on-board calibration

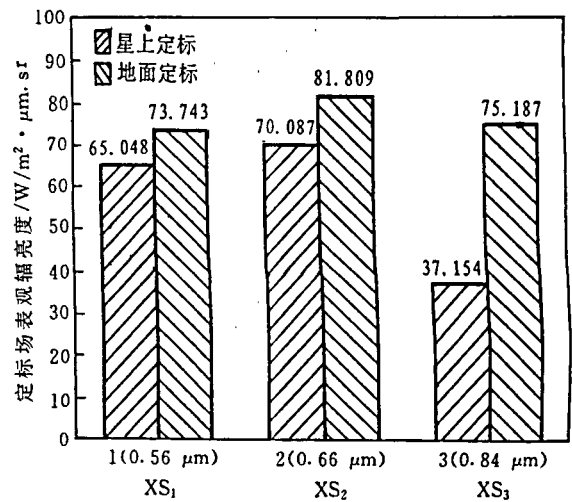


图4 由地面定标与星上定标计算的 La Crau 场表观辐射亮度的比较

Fig.4 Comparison of apparent radiance of La Crau Site calculated from ground calibration and on-board calibration

表2 地物单元光谱反射率反演结果与实测数据的比较

Table 2 Comparison of reflectance retrieved and measured for ground targets

反射率 / % 地物单元	地物光谱仪测值			地面定标后反演值			星上定标后反演值		
	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3
稀疏矮灌丛地	10.9	14.31	30.21	9.56	13.87	27.66	9.02	13.1	21.64
豆地	14.14	22.23	28.65	13.5	211.1	26.14	12.17	20.5	22.6
畜牧草地	7.37	6.22	49.86	6.94	5.8	45.14	6.2	5.13	31.2
裸土地	9.26	11.24	42.12	8.31	9.5	39.22	7.9	8.7	32.4

定标的不确定度可达到 6%。应注意的是,利用该方法估算的定标不确定度的结果包括定标的不确定度和反演计算的不确定度,但该结果可表明定标的不确定度最大阈值。在要求计算定标不确定度,而有关的辅助数据不足的情况下,利用地物反射率反演方法来估算仍然可以评判定标不确定度是否满足某些应用的需要。

(4) 由于星上定标与地面定标互相独立, HRV XS1 和 XS2 两通道在其定标系数和不确定度在一定精度范围内的一致性可验证这两种定标结果的可靠性。同时可说明相应 HRV XS3 的星上定标响应率衰减可能已远超过绝对定标要求,对定标精度要求高的应用需要加以修改。

## 9 结 论

综上所述分析,可得出以下结论:

(1) 由地物反射率实测值和反演值的比较可知,本次实验期间, SPOT-2 HRV 的地面辐射场定标结果比星上定标结果精度高;

(2) 6S 大气辐射传输模型不仅可用来定标,同时可进行辐亮度、反射率物理量的反演,而且实用、精度高、操作方便。

(3) 通过反演地物光谱反射率可知,星上定标和地面定标方法都存在有一定的系统误差。

(4) 用地物反射率反演值与实测值对比分析,可估算定标结果的不确定度的最大阈值,从而可进一步判定定标结果是否满足某些应用的需要。

(5) 通过星上定标和地面定标这两种互相独立的方法在其一定精度范围内的一致性可以说明定标结果的可靠性。

(6) 利用两种或两种以上独立定标方法所得定标结果的差异分析,可以帮助诊断遥感器的状态的变化,还可以说明其中一个定标方法的某种不适当之处或错误(如 HRV XS3 通道的响应率有很大衰减),然后可想办法修改这种标定方法,以便提高将来的定标和测量精度,同时用来指导实际应用。

## 参 考 文 献

- 1 R. Santer, X. F. GU, G. Guyot, *et al.* SPOT Calibration at the La Crau Test Site(France). *Remote Sensing. Environ.*, 1992, 41: 227—237.
- 2 Slater, P. N. *et al.* Review of the Calibration of Radiometric measurements from Satellite to Ground Level. Commission VII WG 3 Int. Soc. Photogrammetry and Remote Sensing in Kyoto, Japan, 1988.
- 3 London J., *et al.* Atlas of the Global Distribution of Total Ozone July 1975—June 1967. NGAR Technical Note, No 113 + STR, 1976.
- 4 Liou, K. 1980, Calibration of the METEOSAT-VIS Channel by Airborne Instruments. *Appl. Opt.* 20(1), 111—122
- 5 Tanre, D., Deroo, C., Duhaut, P., *et al.* The Second Simulation of the Satellite in the Solar Spectrum(6S) User Guide. Laboratoire d'Optique Atmospherique, U.S.T.de Lille, 59655 Villeneuve d'aseq, France, 1986.

## 作 者 简 介

田庆久,男,1964年5月生,硕士,副研究员。1987年毕业于山东大学光学系红外专业。一直从事成像光谱遥感(包括多光谱遥感)的定标、反演、定量化及应用研究,同时从事地物光谱分析和光谱分析模型的建立。10年来,共参加课题20多项,包括国家攻关、重大基金、国际合作、863高技术项目。1995—1996年两次赴法国农业科学院从事遥感的定标定量化研究工作。发表论文20余篇。

## Comparison and Analysis for In-Flight Calibration of SPOT Based on Methods of Test Site and On-Boarding Calibration

Tian Qingjiu Zheng Lanfen Tong Qingxi

(Institute of Remote Sensing Applications, CAS Beijing 100101)

**Abstract** This research was for in-flight SPOT calibration conducted in July, 1995. SPOT HRV was calibrated by La Crau test site and on-boarding calibration methods. 6S CODE was used for test site calibration and reflectance retrieval of some ground targets. The calibration coefficient  $A$  &  $A'$  was calculated. The calibration results based on both methods were compared and analysed. The analysis results have shown that: (1) calibration precision based on test site is higher than that obtained from

on-board calibration;(2) 6S CODE is practical and fast for calibration and reflectance retrieval;(3) there are system errors in both methods;(4) the uncertainty of calibration coefficients can be estimated by the retrieved reflectance of some targets; (5) the reliability of calibration result is proved by the consistence in calibration precision range for both or more independent methods;(6) the calibration result difference for different calibration methods can be used to diagnose the sensor state and to correct inadequate method or some mistakes, and also to guide the applications.

**Key words** Remote Sensing, Calibration, Retrieval, Reflectance, Uncertainty