

FY- 1C 遥感器可见-近红外各通道在轨辐射定标^{*}

张玉香 张广顺 黄意玢 邱康睦 胡秀清 戎志国 王维和 刘志权
张立军 朱舜斌 王永宽 李昌宝 夏 青 陈秀莲 方宗义

(中国气象局国家卫星气象中心, 北京, 100081)

摘 要

文中通过 1999 年 7 月利用敦煌辐射定标场和反射率基法对 FY- 1C 气象卫星遥感器可见-近红外通道进行的第一次在轨辐射定标试验, 研究和试验了卫星遥感器的在轨辐射定标方法、同步观测方法和辐射传输计算算法及其软件开发, 有 7 个通道的绝对辐射定标系数(或称为增益和偏离量) 被获得。经过误差分析, 认为本次定标的不确定度小于 7%。定标获得的 7 个通道定标系数与该卫星发射前定标结果比较, 其中 5 个通道(通道 1, 2, 7, 8, 10) 结果比较接近, 另两个通道(通道 6, 9) 由于发射前定标误差较大致使二者有一定差别。另外, 通过 2000 年 9 月份对 FY- 1C 卫星进行的第二次辐射定标试验, 使该卫星在轨 1 a 多来的运行状态得到了定量监测, 本次定标与 1999 年 7 月的定标结果比较, 发现可见-近红外各通道性能均有程度不同的衰减, 尤其是通道 1, 7, 8 性能衰减分别为 35%, 28%, 22%, 而通道 2, 6, 9, 10 性能衰减较小(为 10% 左右)。

关键词: 辐射定标, 反射率基法, 表观反射率, 定标系数。

1 引 言

随着观测卫星遥感技术的深入发展, 卫星遥感从定性的图像识别发展到了定量化的应用阶段, 特别是随着遥感卫星的迅速发展, 对卫星遥感数据的量化应用的需求也日益迫切。为了使卫星遥感达到量化应用, 20 世纪 70 年代, 国外航天大国开始研究利用地面大面积稳定目标对卫星遥感仪器进行在轨辐射定标, 美国 NASA 和亚利桑那大学光学科学中心利用美国新墨西哥洲的白沙场(WSMR), 对 LANDSAT TM 等多颗卫星传感器进行了绝对辐射定标试验; 法国利用马赛附近的 La Crau 试验场对 SPOT HRV 传感器进行了辐射定标, 多次试验证明, 利用地面试验场进行卫星遥感器的辐射定标是实现卫星遥感量化的有效方法之一。由国家卫星气象中心牵头, 国内卫星遥感科研和应用单位参与合作, 从 1993 年开始经过考察、论证确定敦煌戈壁作为可见-近红外波段辐射校正场、青海湖广阔的水面作为热红外波段辐射校正场。从而, 开始了中国遥感卫星辐射校正场项目的建设和辐射校正方法与

技术的研究工作。

敦煌辐射定标场位于甘肃省敦煌市以西 15 km 外(40°08' N, 94°20' E), 拔海高度 1194 m; 面积大于 (30×30) km²; 地表特征为再生冲击形成的戈壁滩, 地势平坦, 无植被覆盖, 朗伯特性好。该地区气候特征为大陆性干燥气候, 大气干洁, 无污染。敦煌试验场以上地面、大气状况为不同分辨率遥感器的在轨辐射定标提供了良好条件。

在中国遥感卫星辐射校正场项目支持下, 利用敦煌校正场先后进行了 FY- 1C, FY- 2B 气象卫星和中-巴资源- 1 号(CBERS- 1) 卫星在轨辐射定标试验, 并取得了较好的结果。

2 反射率基辐射定标方法和流程

卫星遥感仪器可见-近红外通道的在轨辐射定标国外一般采用 3 种方法: 反射率基法、辐照度基法(即改进的反射率基法) 和辐亮度基法^[1~3]。反射率基法是当卫星飞越辐射校正场上空的同时, 进行场地面反射比测量、大气消光观测和气象、探空观测。辐照度基法除与反射率基法所需观测设备相同

^{*} 初稿时间: 2001 年 3 月 19 日; 修改稿时间: 2001 年 10 月 24 日。
资助课题: “中国遥感卫星辐射校正场”项目

外, 另外需增加漫射辐射与总辐射之比观测。这种方法避开对气溶胶模型所做的假设, 因而减少了与之相关的误差^[2]。辐亮度基法是将经过精确标定的辐射计放在待定目标上方足够高的位置上(如置于海拔 3000 m 以上高的飞机上), 从空中与卫星同步测量场区目标的辐亮度, 然后将机载辐射计获得的辐亮度转换成卫星高度处辐亮度, 实现在轨遥感器的辐射定标。FY- 1C 卫星遥感器定标采用的是反射率基法。

FY- 1C 气象卫星遥感器有 10 个通道, 其中 7 个通道(1, 2, 6, 7, 8, 9, 10) 为可见- 近红外通道, 通谱带分别为: 0. 58~ 0. 68 μm, 0. 84~ 0. 89 μm, 1. 58~ 1. 64 μm, 0. 43~ 0. 48 μm, 0. 48~ 0. 53 μm, 0. 53~ 0. 58 μm, 0. 90~ 0. 965 μm。

FY- 1C 于 1999 年 5 月 10 日发射升空, 50 多天后在敦煌定标场对这颗卫星的可见- 近红外 7 个通道进行了在轨辐射定标试验。

反射率基辐射定标方法的具体做法是, 当卫星飞越敦煌定标试验场上空的同时, 进行场地地表面反射比测量、场地周围大气消光测量和探空及常规气象观测、同时获取场区各采样点的定位信息。通过对观测数据的处理, 获得辐射定标计算的中间参数。将这些参数输入 6S 辐射传输模型^[4], 得到卫星观测高度遥感器入瞳处各光谱通道的表观辐亮度或表观反射率。另外, 对卫星观测图像进行地标导航, 进行星- 地测区几何配准, 然后提取测区内卫星观测像元记数值并取平均, 同时提取卫星扫描冷空间时的记数值。将表观反射率与卫星观测记数值比较得到卫星各通道定标系数。

对于通道 i 探测器测量的平均表观辐亮度 L_{im} 为:

$$L_{im} = \int R_{\lambda} L_{i\lambda} d\lambda / \int R_{\lambda} d\lambda \tag{1}$$

其中 R_{λ} 为探测器光谱响应, $L_{i\lambda}$ 通道 i 波长为 λ 时的表观辐亮度。

对于平均表观辐亮度 L_{im} 与探测到的记数值 C_i 的关系为:

$$L_{im} = A_i C_i + B_i \tag{2}$$

其中 A_i 为增益, B_i 为截距。

卫星遥感器入瞳处各通道表观辐亮度用表观反射率表示为:

$$\rho_i^* (\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = [\pi L_i (\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) (r/r_0)^2] / (E_{0i} \cos \theta_s) \tag{3}$$

式中, $\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v$ 分别为太阳、卫星天顶角和方位角, L_i 为表观辐亮度, E_{0i} 是大气外界太阳辐照度, r_0/r 为平均与实际日- 地距离之比。

对于朗伯特性较好的地面目标, 表观反射率 $\rho_i^{* [2]}$ 表示为:

$$\rho_i^* (\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) = \left\{ [\rho_{Ai} (\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v) + \tau_i (\theta_s) \rho_i \tau_i (\theta_v)] / (1 - \rho_{si}) \right\} T_{gi} \tag{4}$$

这里, ρ_{Ai} 是大气向上散射反射率, τ_i 是大气自身透过程, ρ_i 为地表反射率, s_i 为大气球反照率, T_{gi} 为吸收气体透过程。

在太阳垂直入射、平均日- 地距离条件下, 表观反射率 ρ_i^{**} 与卫星测量计数值关系为:

$$\rho_i^{**} = a_i (C_{im} - C_{0i}) \tag{5}$$

$$\text{截距 } b_i = a_i \cdot C_{0i} \tag{6}$$

a_i, b_i 为待求的定标系数。

反射率基定标流程图:

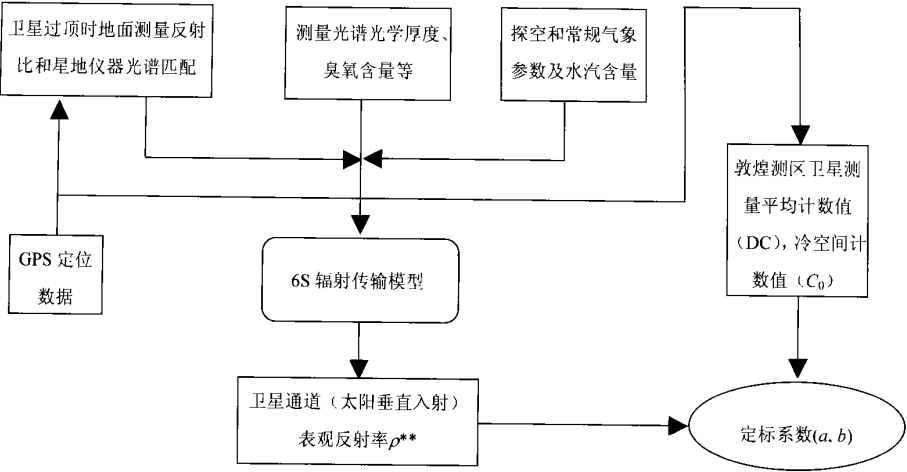


图 1 FY- 1C 可见- 近红外通道定标流程图

3 星-地同步观测结果

3.1 地表反射比测量

1999 年 7 月 7 日, 16 日和 17 日 3 次进行 FY-

1C 卫星敦煌场地同步(或准同步)观测。准同步观测时间为卫星过顶前后 1 h。以上 3 次卫星过定标场参数和观测时间如表 1 所示。

表 1 敦煌场同步观测参数

时 间	卫星过境时间	同步观测时间	卫星天顶角	卫星方位角
7 月 7 日	10: 31	9: 30~ 11: 16	23. 53°	99. 03°
7 月 16 日	10: 46	9: 45~ 11: 47	0. 32°	101. 47°
7 月 17 日	10: 36	9: 35~ 11: 18	15. 0°	98. 3f°

针对 FY- 1C 气象卫星星下点分辨率为 1. 1 km 和卫星关于敦煌地面测量数据分析, 在敦煌场试验区(20 km×20 km)内选取 10 km×10 km 的同步观测区。同步观测区坐标为: 40°05′20″~ 40°10′56″N 和 94°17′0″~ 94°24′30″E。

参考 FY- 1C 卫星 1999 年 6 月 22 日通道 1 对同步区所测记数值, 选取对应 9 个格作为同步观测采样点(图 2):

地面测量仪器为 CE313 通道式辐射计(通道与 FY- 1C 可见- 近红外通道相似)和 FR ASD 野外光谱仪(350~ 2500 nm), 并配有漫反射标准参考板(45 cm×45 cm), 利用上述仪器, 同时对同步区地表进行反射比测量。测量时每个采样格点进行 2 次参考板和 5 次目标取样测量, 并且每个采样点测量在 1 min 内完成以减少太阳辐照度变化对测值的影响^[3]。这样, 整个同步测区共获得 45 组反射比数据。

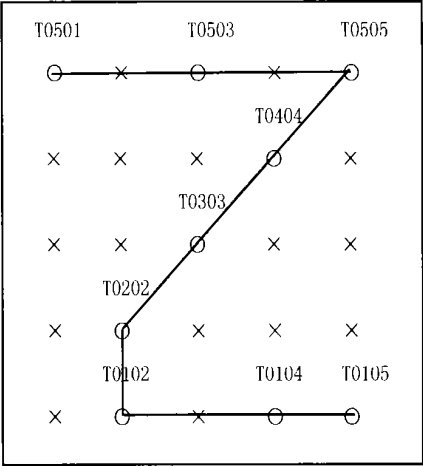


图 2 采样点分布

(× 为同步区未采样格点, ○为采样格点)

CE313 野外辐射计和 FR ASD 野外光谱仪的测量结果^[6]如图 3。

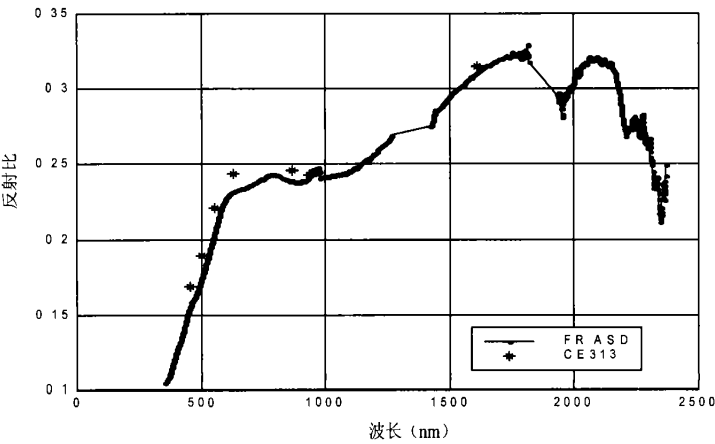


图 3 敦煌场同步观测地面反射比

为了支持同步观测数据处理中的方向校正和像元匹配处理, 试验中还分别完成了两种辅助观测: 细

网格点目标反射比测量和双向反射比(BRF)测量。

3.2 大气消光光学厚度观测

为了获得场区上空大气消光光学厚度和气溶胶消光光学厚度、臭氧、水汽含量以及大气透过率等参数, 利用法国生产的 CE318 自动跟踪太阳光度计对太阳直射辐射进行了测量, 利用 OL- 754 照度计对天空漫射辐射和太阳总辐射进行了测量。

利用 CE318 测值和兰勒方法(Langley) 得到总大气消光光学厚度^[7, 8], 利用当地气压测值计算出瑞利(Rayleigh) 散射光学厚度, 然后从总消光光学厚度中分离出气溶胶消光光学厚度。对于 7 月 7, 16, 17 日获得的气溶胶光学厚度为 0. 0866, 0. 116 和 0. 113^[8], 来自 NASA TOMS 的臭氧含量为 0. 298, 0. 293 和 0. 294 cm。由探空数据获得水汽含量为 1. 45, 3. 01 和 2. 52 g/ cm²。

通过太阳光度计测值和 6S 模拟计算比较, 初步确定出敦煌场气溶胶类型接近于 6S 模型中设定的

沙漠型^[4]。

4 定标计算及结果分析

按照图 1 流程设计, 卫星入瞳处表观反射率需要利用 6S 程序包计算获得, 计算前首先进行星- 地仪器光谱响应匹配。

$$f_{im} = \left(\int_{\lambda} r_{i\lambda} R_{i\lambda FY} / \int_{\lambda} R_{i\lambda FY} \right) \cdot \left(\int_{\lambda} r_{i\lambda} R_{i\lambda CE} / \int_{\lambda} R_{i\lambda CE} \right)^{-1} \quad (7)$$

f_{im} 为通道 i 的匹配因子, $r_{i\lambda}$ 是由 FR 光谱仪测量的反射比, $R_{i\lambda FY}$ 是 FY- 1C 通道 i 的光谱响应, $R_{i\lambda CE}$ 为 CE313 通道 i 的光谱响应。

关于 FY- 1C 与 CE313 滤光片响应曲线如图 4, 5 所示。

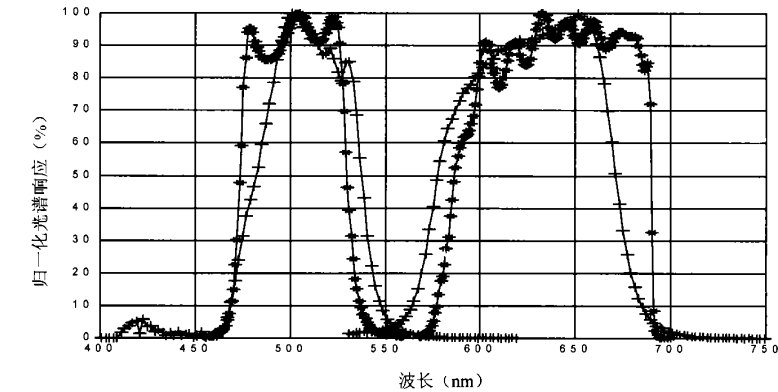


图 4 FY- 1C 通道 1,8 与 CE313 近似带宽滤光片透过率曲线

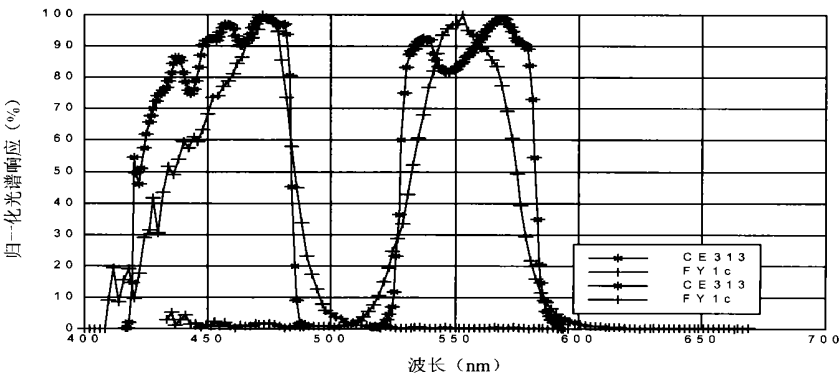


图 5 FY- 1C 通道 7,9 与 CE313 近似带宽滤光片透过率曲线

由式(7) 获得的 FY- 1C 7 个通道与 CE313 滤光片匹配结果(表 2), 利用表 2 中匹配因子和 CE313 同步测量反射比得到 FY- 1C 等效地面测量反射比。

将地面同步测量获得反射比、大气气溶胶光学厚度、水汽含量以及太阳和卫星几何位置参数等输入到 6S 辐射传输模型^[4], 获得 FY- 1C 可见- 近红外通道卫星高度处表观反射率。利用敦煌场附近的

党河水库作为地标进行星-地测区配准,然后提取卫星测量测区的平均记数值和卫星扫描冷空间记数值,将记数值和表观反射率并利用式(5)和(6),得到FY-1C各通道定标系数(a , b)。关于获得的FY

-1C各通道定标系数和发射前定标结果见表3(7月16日定标结果由于受降水过程影响,所以在表3中未列出)。
从表3中看出1999年7月7日与17日场地辐

表2 FY-1C可见光-近红外通道与CE313野外辐射计滤光片匹配因子

通道	1	2	6	7	8	9	10
匹配因子	0.9925	0.9988	1.0038	1.0149	1.0177	0.9893	1.0071

表3 可见-近红外通道定标结果

通道	波长(μm)	1999年07月07日		1999年07月17日		发射前定标	
		a	b	a	b	G	I
1	0.58~0.68	0.0829	0.9953	0.0812	0.9747	0.0918	0.3615
2	0.84~0.89	0.0892	0.9811	0.0912	1.0030	0.0923	0.4358
6	1.58~1.64	0.0598	0.7175	0.0618	0.7422	0.0840	0.3321
7	0.43~0.48	0.0483	0.6760	0.0475	0.6649	0.0526	0.3696
8	0.48~0.53	0.0479	0.5269	0.0470	0.5166	0.0536	0.4827
9	0.53~0.58	0.0777	1.0100	0.0760	0.9885	0.0537	0.4855
10	0.90~0.965	0.0902	1.0820	0.0939	1.1263	0.0952	0.4153

注: a 为斜率, b 为截距, G 为发射前定标增益, I 为偏离量。

射定标结果一致性较好,获得的定标斜率相对差除了通道6为3.3%和通道9为4.1%外,其他通道均为2%左右。分别用场地定标系数和用发射前定标系数计算敦煌场地表反射比,7个通道中5个通道结果相近,反射比绝对差在2%左右,而通道6和通道9结果差别为4%左右。

FY-1C卫星在轨运行1a以后,为了监测该卫星在轨运行状态,于2000年9月,利用敦煌定标场进行了FY-1C第二次在轨辐射定标试验。根据卫星轨道参数,选择9月13,14和22日作为同步观测日,这次同步观测安排,以1999年同步观测为基础

作了适当调整。对于目标采样点选取,在同步观测区内选择11个采样点,利用两台同样的CE313辐射计,一台专门进行地面目标测量(每个采样点10个子采样点测量),另一台在场区内固定地点连续对参考板测量;利用FR ASD仪器对每个采样点进行2次参考板/5个子采样点测量,同时利用GPS对各同步采样点进行定位。

经过数据处理,获得了FY-1C可见-近红外7个通道新的定标系数。为了分析FY-1C卫星遥感器在轨运行一年来性能变化,这里列出2000年9月22日与1999年7月7日定标结果(表4)。

表4 1999年7月7日和2000年9月22日定标结果

通道	波长(μm)	1999年7月7日		2000年9月22日	
		a	b	a	b
1	0.58~0.68	0.0829	0.9953	0.1414	-1.6970
2	0.84~0.89	0.0892	0.9811	0.1072	-1.1795
6	1.58~1.64	0.0598	0.7175	0.0685	-0.8214
7	0.43~0.48	0.0483	0.6760	0.0703	-0.9839
8	0.48~0.53	0.0479	0.5269	0.0646	-0.7111
9	0.53~0.58	0.0777	1.0100	0.0913	-1.1867
10	0.90~0.965	0.0902	1.0820	0.1094	-1.3126

为便于直观比较FY-1C遥感器可见-近红外通道在轨性能变化,图6,7和8显示了通道1,2和通道7发射前、1999年和2000年定标结果。

从表4和图6,7,8中1999年与2000年定标结果看出,FY-1C卫星在轨运行1a多来,辐射计各

通道性能都有程度不同的衰减,尤其是通道1,7,8性能衰减分别为35%,28%,22%,而通道2,6,9,10性能衰减较小(为10%左右)。利用2000年通道1和通道2在轨辐射定标系数取代1999年的定标数据进行全球植被指数计算,使全球植被分布图像得

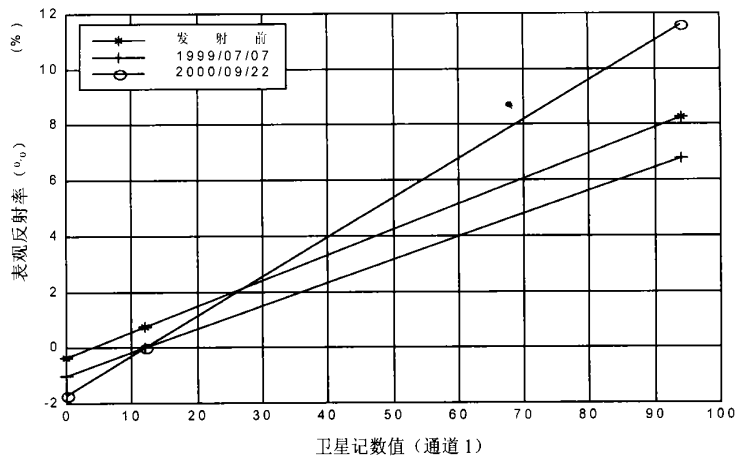


图6 FY- 1C通道 1发射前、1999 年和 2000 年定标曲线

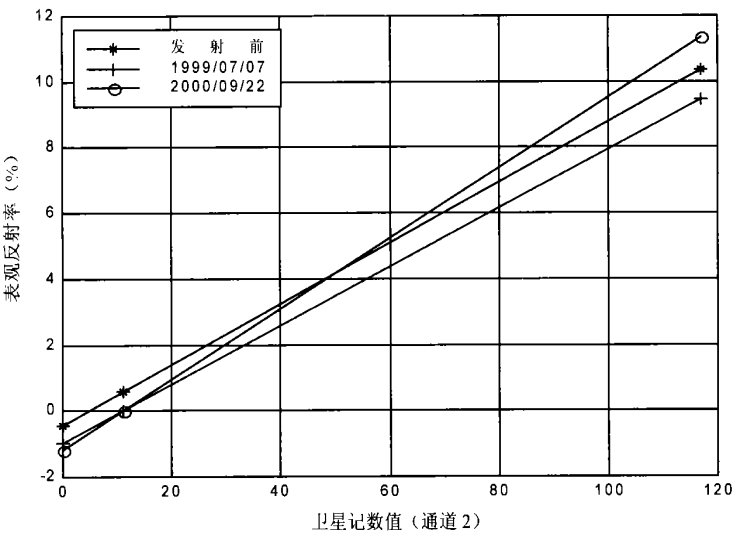


图7 FY- 1C通道 2发射前、1999 年和 2000 年定标曲线

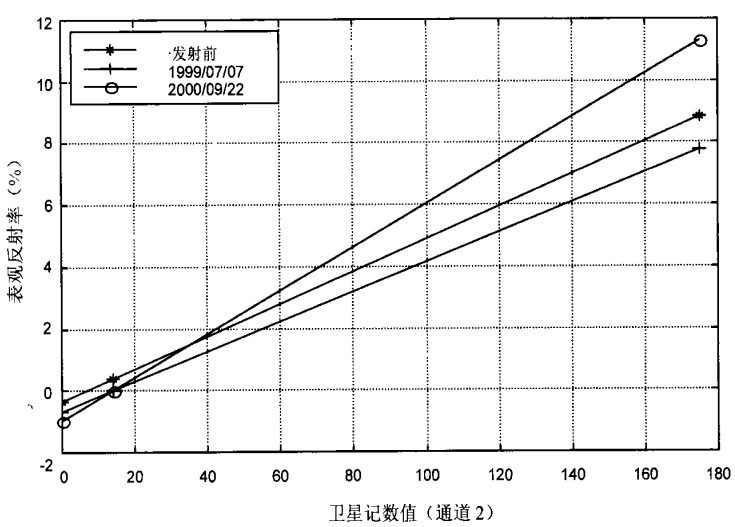


图8 FY- 1C通道 7发射前、1999 年和 2000 年定标曲线

到校正。

5 误差估算

在反射率基辐射定标方法中,影响定标的环节较多,如地面和大气参数测量误差、模型的假设和辐射传输模式本身误差等等。对参与定标误差贡献的不确定度通常用平方和的根表示^[1]。经过对参与定标的主要误差贡献进行初步核算并结合 6S 程序包进行模拟,认为地表反射比测量误差在总误差贡献中权重最大,它的误差贡献几乎是等量传递的。对参与误差贡献的主要因素分析和参照文献[1],初步认为FY- 1C卫星可见-近红外通道反射率基法辐射定标的不确定度小于 7.0%(平方和的根),(见表 5)。

表 5 可见-近红外通道定标误差

误差源	测量误差(%)	总误差贡献(%)
光学厚度测量		2.1
消光光学厚度	5.4	
Mie 散射和瑞利散射	5.0	
气溶胶类型选择		2.5
气溶胶复折射指数		1.5
吸收气体		2.12
臭氧含量	20	
水汽含量		
模型固有精度		2.0
地面反射比		2.7
反射板定标	1.92	
反射比测量	1.0	
参考板放置水平	1.0	
非朗伯地面特性		1.0
野外漫射光校正		1.5
太阳天顶角误差不确定性		2.0
总误差(平方和的根)		6.0

参考文献

1 Biggar S F, Slater P N, Gellman D I. Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4 to 1.1 μm range. Remote Sens Environ, 1994, 48: 245~ 252

2 Slater P N, Biggar S F. Vicarious Radiometric calibration of EOS sensors, J Atmos Ocean Techno, 1995

3 Robert J Frouin, James J Simpson. Radiometric calibration of GOES- 7 VISSR Solar channels during the GOES Pathfinder Benchmark Period. Remote Sens Environ, 1995, 52: 95~ 115

4 Tanre D, Deroo C, Duhaut, et al. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum the 5S code. Int J Remote Sens, 1990, 11: 659~ 668

5 James E, Vogelmann, David M Moss. Spectral reflectance measurements in the Genus Sphagnum. Remote Sens Environ, 1993, 45: 273~ 279

6 Yuxiang Zhang, Guangshun Zhang. Spectral reflectance measurements at the China radiometric calibration test site for the remote sensing satellite sensor. ACTA Meteorological Sinica, 2001, 15: 377~ 382

7 Biggar S F, Gellman D I, Slater P N. Improved evaluation of optical depth components from Langley Plot data. Remote Sens Environ, 1990, 32: 91~ 101.

8 胡秀清, 张玉香, 张广顺等. 中国遥感卫星辐射校正场气溶胶光学特性观测研究. 应用气象学报, 2001, 12(3): 257~ 266

利用 FY- 1C 通道 1, 2 在轨辐射定标系数反演敦煌地面反射比与 NOAA - 15 卫星遥感器对应通道过敦煌场测量反射比比较见表 6, 结果表明, 通道 1 与 NOAA- 15 结果十分接近, 通道 2 因波段宽度差异(NOAA- 15 通道 2 带宽为 0.7~ 1.1 μm , 中间包括 940 nm 水汽吸收带)致使二者有 2% 的偏差。

表 6 利用 1999 年 7 月 7 日定标反演场地反射比与 NOAA- 15 结果比较

卫星型号	通道 1 反射率(%)	通道 2 反射率(%)
FY- 1C	22.87	21.39
NOAA- 15	23.08	19.42

6 结 语

通过敦煌定标场 1999 年和 2000 年对 FY- 1C 可见-近红外通道辐射定标试验,对辐射定标方法和定标技术的研究获得了很好的结果,对卫星遥感器在轨定标业务化运行积累了经验。试验获得的定标系数对 FY- 1C 卫星遥感数据的定量使用提供了基础数据。另外,由于敦煌场较好的地面、大气条件,对利用直接测量手段进行低分辨率卫星的在轨定标是一个很好的尝试,并且可以证明是完全可行的。

致谢:感谢安光所乔延利、陆亦怀、易维宁等同志在场地同步观测中进行细网格测点反射比测量和 BRDF 测量。核工业北京地质研究院刘京晶同志;地矿部地质遥感中心的党福星、刘刚、尹泽伦;中国科学院大气物理研究所的王平同志以及天津海洋技术所的谭世祥等同志参加了同步观测试验,为此表示感谢。感谢卫星中心的赵君青、田斌、李广、朱文田、郝建国等同志参加协助完成同步观测试验。感谢敦煌气象局提供气象观测和给予的后勤支持。

IN- FLIGHT VICARIOUS RADIOMETRIC CALIBRATION FOR VIS- NIR CHANNELS
OF FY- 1C SATELLITE SENSOR AT DUNHUANG SITE

Zhang Yuxiang Zhang Guangshun Huang Yibin Qiu Kangmu Hu Xiuqing
Rong Zhiguo Wang Weihe Liu Zhiquan Zhang Lijun Zhu Shunbin
Wang Yongkuan Li Changbao Xia Qing Chen Xiulian Fang Zongyi
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

First radiometric calibration for VIS- NIR channels of FY- 1C meteorological satellite sensor was performed at China Dunhuang Calibration Test Site on July 7, 16 and 17, 1999. The radiometric calibration adopted the reflectance- based method. First of all the ground reflectance at the test site and atmospheric parameters were obtained when FY- 1C overpassed . Based on these data , a radiative transfer code (6S) was run. The apparent reflectance of FY- 1C' s VIS- NIR channels was obtained. By geometric registration of the satellite- ground pixels and a comparison of the mean digital counts with the apparent reflectance, the calibration coefficients (gain and offset) from seven channels of FY- 1C (center wavelength: 455, 505, 555, 630, 865, 932. 5 and 1610 nm) were determined. An error budget of the reflectance- based calibration method shows that the uncertainty is less than 7%. Comparing the calibration results with the pre- launch calibration, a better agreement at five channels is achieved except the ones in channels 9 (555 nm) and channel 6 (1610 nm) . Second radiometric calibration of VIS- NIR of FY- 1C satellite sensor was made in September 2000. The results of the calibration monitored an attenuation of FY- 1C satellite sensor. The new calibration coefficients are important for quantitative application of FY- 1C satellite observation data.

Key words: Radiometric calibration, Reflectance- based method, Apparent reflectance, Calibration coefficient.