

文章编号: 0253-2239(2009)01-0041-06

风云二号静止气象卫星可见光通道辐射 校正场定标方法研究

李 元 张 勇 刘京晶 戎志国 张立军 张玉香

(中国气象局国家卫星气象中心预处理室, 北京 100081)

摘要 为了对风云二号 C 星(FY-2C)与 D 星(FY-2D)扫描辐射计(VISSR)的可见光通道进行定标, 国家卫星气象中心联合多家单位在中国遥感卫星辐射校正场敦煌场开展了时间跨度达 3 个月的场地替代定标同步试验, 获取了多组试验数据。通过使用刘京晶建立的敦煌地表反射比双向反射分布函数(BRDF)模型对实测的敦煌地表反射比数据进行方向性修正; 使用 6S 模型计算表观反射比并进行天顶角余弦和日地距离修正; 从 4 d 试验数据中计算得到了相对标准偏差小于 5.6%(FY-2C)和 2.4%(FY-2D)的 4 组定标系数。在不同野外环境、不同太阳几何位置参数下获得了相对一致的定标系数, 说明定标算法的准确性和稳定性。

关键词 大气光学; 辐射定标; 定标系数; 反射比基法; 双向反射分布函数

中图分类号 TP722.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092901.0041

Calibration of the Visible and Near-Infrared Channels of the FY-2C/FY-2D GEO Meteorological Satellite at Radiometric Site

Li Yuan Zhang Yong Liu Jingjing Rong Zhiguo Zhang Lijun Zhang Yuxiang

(*Institute of Satellite Meteorology, National Satellite Meteorological Center,*

China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract In order to calibrate the visible and near-infrared channels of FY-2C & FY-2D's visible and infrared spin-scanning radiometer (VISSR), National Satellite Meteorological Center (NSMC) associated with other organizations went to China radiometric calibration site of remote sensing satellite-Dunhuang to take site vicarious calibration synchronous experiment. The experiment continued for three months and a lot of experimental data have been gotten. From four days' experimental data, the calibration coefficients with relative standard deviations below 5.6% (FY-2C) and 2.4% (FY-2D) are calculated. The reflectance of Dunhuang was corrected by the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model calculated by Liu Jingjing, the apparent reflectance was calculated by the use of 6S model and was corrected by the sun zenith cosine and sun-earth distance. From the different experimental data measured in different field conditions and sun position, the accordant calibration coefficients were gotten, and it showed the veracity and stability of the calibration arithmetic.

Key words atmospheric optics; radiometric calibration; calibration coefficient; reflectance-based method; bidirectional reflectance distribution function

1 引 言

目前在轨运行的风云二号静止气象卫星包括 C 星与 D 星, 分别位于东经 105°与东经 86.5°的赤道上空, 轨道高度 36000 km。由于卫星在轨运行期间, 卫星光谱响应特性会逐渐发生漂移, 灵敏度也产生衰减, 定期对其进行在轨辐射定标成为定量遥感应用的关键^[1~7]。FY-2C/FY-2D 星上均没有搭载可见光通道的定标装置, 其在轨定标以辐射校正场场地

定标为主。本文主要介绍了使用更加精确的测量方法、时间跨度更长的测量数据和更加先进的双向反射分布函数(BRDF)模型对 FY-2C/FY-2D 星可见光通道进行在轨场地定标的方法。

2 定标流程与方法

中国静止气象卫星可见光通道在轨定标以敦煌遥感卫星辐射校正场替代定标为主^[8,9], 同时研究

收稿日期: 2008-04-09; 收到修改稿日期: 2008-07-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(40705011)资助项目。

作者简介: 李 元(1978—), 女, 助理研究员, 主要从事辐射定标方面的研究。E-mail: liyuanylilian@sina.com

所有可能的太阳与卫星位置。2006 年 8 月刘京晶等在中国辐射校正场敦煌场同步观测试验中完成近太阳主平面的方向反射比测量,并据此反演了敦煌场地的 AMBRALS BRDF 模型参数^[19~21]。

为了证明建立的敦煌 AMBRALS BRDF 模型的正确性,使用 ASD 沿 FY-2C/FY-2D 扫描辐射计观测角度直接测量若干组敦煌地表光谱反射比,用来与模型计算结果进行比较,如表 1,表 2 所示。

表 1 2007 年 10 月 12 日 FY-2C 可见光通道地表反射比
Table 1 Apparent reflectance of visible and near-infrared channel of FY-2C on 20071012

| G. M. T. | Actual measurement | Calculated by AMBRALS model | Relative error of AMBRALS / % |
|----------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 5:00 | 0.3502 | 0.3379 | 3.4907 |
| 5:30 | 0.3566 | 0.3211 | 9.9355 |
| 7:00 | 0.2816 | 0.2752 | 2.2725 |
| 7:10 | 0.2688 | 0.2721 | 1.2145 |

表 2 2007 年 10 月 12 日 FY-2D 可见光通道地表反射比
Table 2 Apparent reflectance of visible and near-infrared channel of FY-2D on 20071012

| G. M. T. | Actual measurement | Calculated by AMBRALS model | Relative error of AMBRALS / % |
|----------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 5:00 | 0.3568 | 0.3213 | 9.9443 |
| 5:30 | 0.3318 | 0.3313 | 0.1353 |
| 7:00 | 0.3086 | 0.3241 | 5.0100 |
| 7:10 | 0.2945 | 0.3199 | 8.6170 |

表 1,表 2 显示当太阳天顶角发生变化时,模型计算结果在多数情况与实测结果一致。为了进一步证明模型的准确性,图 2 比较了不同太阳天顶角下实测的垂直地表反射比与 AMBRALS BRDF 模型的差异。

图 2 数据是在北京时间 11:30~15:30(敦煌当地正午时间前后 2 小时内)按照同步区域划分的同步点位置测量得到的。由于季节不同,正午时刻的太阳天顶角有明显差异。随太阳天顶角的增大,垂直地表反射比逐渐减小;实测的垂直地表反射比与模型相差最大接近 9%,不过其平均值与模型相差在 5% 以内。

该论述说明 AMBRALS BRDF 模型是比较准确的,但也反映了由于敦煌测区内地表的不均匀性,不易直接使用 AMBRALS BRDF 模型的计算结果。由于相同的原因,实际测量的卫星视角方向的地表反射比也不能直接用来定标。所以在计算地表反射比时,以垂直观测的平均地表反射比与 AMBRALS BRDF 模型计算出的实时修正系数的乘积作为沿卫星视角的地表反射比,表示为

$$\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = A_r(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \times \rho_m(\theta_s, 0, \phi_s - \phi_v), \quad (3)$$

$$A_r(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \frac{\rho_{AMBRALS}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{\rho_{AMBRALS}(\theta_s, 0, \phi_s - \phi_v)}, \quad (4)$$

式中 $\rho_{AMBRALS}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 和 $\rho_{AMBRALS}(\theta_s, 0, \phi_s - \phi_v)$ 分别为在一定太阳位置 (θ_s, ϕ_s) 条件下,用 AMBRALS BRDF 模型计算出的沿卫星观测方向和沿垂直方向的地表反射比。

2.2 6S 模型中的 BRDF 计算模块的使用

在进行可见光通道定标时,一般使用 6S 模型来解决存在于太阳-目标-传感器路径上的大气的强烈干扰问题^[22]。6S 模型中自带 BRDF 计算功能,可以减少地表朗伯近似带来的误差,但是 6S 模型中自带的 9 种模型中不包括 AMBRALS BRDF 模型,而目前已有的敦煌 BRDF 模型只有 AMBRALS 一种,所以只能用人工方式把 AMBRALS BRDF 模型数据逐点录入。

用 AMBRALS BRDF 模型生成对应 θ_s 和 $\theta_s = \theta_v$ 时刻的地表方向反射比 $\rho(\theta_s^j, \phi_s^i)$, 其中 $j=0^\circ, 10^\circ, \dots, 85^\circ, i=0^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ$ 。将这两组 13×10 矩阵人工录入 6S 模型的 *.in 文件中,即可参与表观反射比的计算。

2.3 对表观反射比的修正

以往建立可见光通道入射辐射能量与输出计数值之间一一对应关系时,用 6S 模型输出的大气层外表观反射比直接作为入射辐射能量参与计算,这只是在太阳天顶角非常小的情况下的一种近似。对于大的太阳天顶角下的观测数据,余弦订正不可省略,原理为:

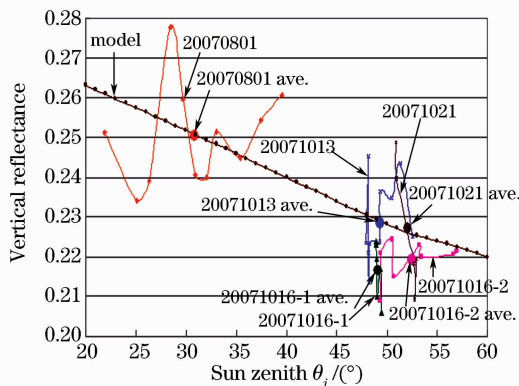


图 2 不同太阳天顶角下实测的垂直地表反射比与模型计算值间的比较

Fig. 2 Comparison between measurement and calculation of vertical apparent reflectance under different sun zeniths

按照 6S 模型使用手册^[22]的定义,模型输出的表观反射比 $\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 可表示为

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \frac{\pi L(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{\cos \theta_s E_0 / \eta}, \quad (5)$$

式中 L 为探测器的入射辐亮度, E_0 为大气层外平均日地距离处的太阳辐照度, $\eta = (r/r_0)^2$ 为日地距离修正系数。(5)式说明表观反射比不能直接反映进入卫星入瞳处的辐射能量的多少,需要进行余弦和日地距离修正。如果将公(1)式改写为

$$S_c = \frac{\pi L(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{E_0 (V_c - V_0)} = \frac{\rho'(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{V_c - V_0}, \quad (6)$$

式中 ρ' 定义为等效反射比,那么它与表观反射比的关系为

$$\rho'(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \frac{\cos \theta_s}{\eta} \cdot \rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v). \quad (7)$$

3 试验数据处理

2007 年 7 月 24 日至 2007 年 10 月 21 日,国家卫星气象中心联合多家单位共同开展 2007 年中国遥感卫星辐射校正场试验。对两颗在轨静止气象卫星同时进行可见光通道场地同步观测试验,包括对场地 BRDF 特性测试和同步开展的地表反射比、大气、气象和高空探空等几个方面的测量。

3.1 数据筛选

2007 年在敦煌共获得 11 天的地表反射比测量数据,其中某些数据因大气状况不够稳定,不适于参与定标。需要先对这些已有数据进行筛选,选出测量时气溶胶光学厚度(AOD)小于 0.2 并保持稳定的地表反射比数据。

在图 3 中,2007 年 08 月 01 日中午以前、10 月 13 日、16 日中午以后和 10 月 21 日这 4 个时段的光学厚度均约在 0.15 且非常稳定,选择这 4 天的地表反射比数据进行定标处理。

3.2 读取卫星数据

风云二号卫星的可见光通道为四元并扫,比单一像元的红外通道图像分辨率高,可得到 1.25 km 分辨率卫星标称图,但是红外通道、地理经纬度、太阳/卫星位置角度标称图的分辨率仅为 5 km。按照 5 km 分辨率风云二号(02)批静止气象卫星标称投影数据集产品(NOM)图像坐标与地理经纬度的对应关系,确定同步观测区域对应到 5 km 分辨率卫星标称图上的坐标范围,再映射到 1.25 km 分辨率卫星标称图上,得到 8 pixel × 8 pixel 点阵,每个点的坐

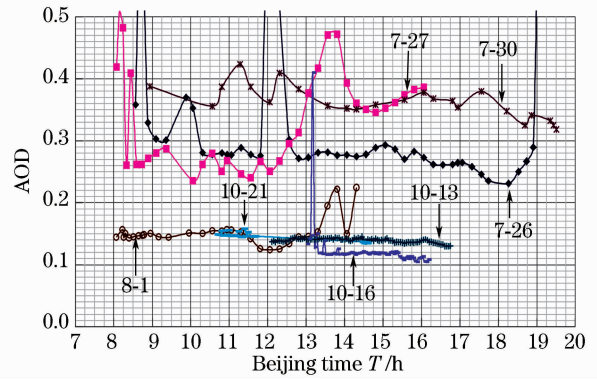


图 3 2007 年同步试验敦煌校正场气溶胶光学厚度(550 nm)日变化

Fig. 3 Daily variation of aerosol optical depth at 550 nm in Dunhuang test site during synchronous experiment in 2007

标分别为:

FY-2C 星:

$$C_{i,j} [i \in (3913, 3920), j \in (1457, 1464)],$$

FY-2D 星:

$$D_{i,j} [i \in (5085, 5092), j \in (1457, 1464)].$$

确定好同步观测区域在卫星标称图上的位置后,即可读出对应区域的平均标称卫星天顶角数据、平均标称太阳天顶角数据、平均标称相对方位角数据和每个点上的代表卫星入瞳上辐射能量的计数值,如表 3 所示。

3.3 计算等效反射比

将太阳位置、测点地理位置、经过 AMBRALS BRDF 模型修正的地表反射比、550 nm 气溶胶光学厚度、大气柱水汽总量、臭氧含量、遥感传感器响应函数、遥感传感器距地距离等参数输入 6S 模型,得到传感器入瞳处的表观反射比;按照(7)式,即可计算得到等效反射比,结果如表 4 所示。

3.4 计算定标系数

风云二号卫星的可见光通道为四元并扫模式, FY-2C 卫星其他三个探测器归一化到第三探测器上,所以仅需对第三探测器进行定标; FY-2D 卫星的可见光通道 4 个探元的差别不明显,未进行归一化处理,需要计算出全部 4 个探元的定标系数。

按照(6)式计算得到 FY-2C 第三探元和 FY-2D 全部 4 个探元定标系数,如表 5 所示。表中 Max D. C. 一行是定标查找表中最大计数值对应的等效反射比,由 4 组定标系数的平均值计算得到。

表 3 不同时刻的 FY-2C 与 FY-2D 卫星计数值

Table 3 Digital number of FY-2C & FY-2D in different moments

| Satellite | Date | G. M. T. | D. N. | Sun zenith /rad | Satellite zenith /rad | Relative azimuth /rad |
|-----------|----------|----------|-------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| FY-2C | 20070801 | 04:30 | 29.70 | 0.4760 | 0.8063 | 5.8423 |
| FY-2C | 20071013 | 05:30 | 26.23 | 0.8352 | 0.8021 | 0.3016 |
| FY-2C | 20071016 | 06:00 | 26.02 | 0.8669 | 0.8071 | 0.4710 |
| FY-2C | 20071021 | 06:00 | 25.25 | 0.8988 | 0.8105 | 0.4739 |
| FY-2D | 20070801 | 04:45 | 27.14 | 0.4453 | 0.8355 | 5.4700 |
| FY-2D | 20071013 | 05:30 | 27.00 | 0.8343 | 0.8570 | 6.1116 |
| FY-2D | 20071016 | 06:30 | 26.47 | 0.8950 | 0.8524 | 0.1645 |
| FY-2D | 20071021 | 06:30 | 25.91 | 0.9266 | 0.8505 | 0.1564 |

表 4 大气层外的等效反射比

Table 4 Equivalent reflectance outside atmosphere

| Satellite | Date | G. M. T. | Vertical reflectance | Real-time correction coefficient | Directional reflectance | Apparent reflectance /% | $\cos \theta_s$ | Earth-Sun distance correction | Equivalent reflectance /% |
|-----------|----------|----------|----------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|
| FY-2C | 20070801 | 04:30 | 0.2503 | 1.091 | 0.2730 | 26.74 | 0.8888 | 1.0300 | 23.07 |
| FY-2C | 20071013 | 05:30 | 0.2285 | 1.407 | 0.3215 | 31.57 | 0.6710 | 0.9956 | 21.28 |
| FY-2C | 20071016 | 06:00 | 0.2192 | 1.356 | 0.2973 | 29.82 | 0.6472 | 0.9939 | 19.42 |
| FY-2C | 20071021 | 06:00 | 0.2271 | 1.375 | 0.3122 | 30.82 | 0.6225 | 0.9911 | 19.36 |
| FY-2D | 20070801 | 04:45 | 0.2501 | 1.005 | 0.2513 | 24.91 | 0.9025 | 1.0300 | 21.82 |
| FY-2D | 20071013 | 05:30 | 0.2283 | 1.487 | 0.3395 | 33.58 | 0.6717 | 0.9956 | 22.66 |
| FY-2D | 20071016 | 06:30 | 0.2190 | 1.544 | 0.3381 | 33.75 | 0.6255 | 0.9939 | 21.24 |
| FY-2D | 20071021 | 06:30 | 0.2269 | 1.568 | 0.3559 | 34.91 | 0.6005 | 0.9911 | 21.15 |

表 5 FY-2C&FY-2D 定标系数

Table 5 Calibration coefficient of FY-2C&FY-2D

| Date | FY-2C /mV ⁻¹ | | FY-2D /mV ⁻¹ | | |
|--------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|
| | 3A | 1A | 2A | 3A | 4A |
| 20070801 | 0.02087 | 0.02254 | 0.02262 | 0.02256 | 0.02263 |
| 20071013 | 0.02368 | 0.02361 | 0.02368 | 0.02362 | 0.02371 |
| 20071016 | 0.02193 | 0.02289 | 0.02294 | 0.02292 | 0.02298 |
| 20071021 | 0.02306 | 0.02364 | 0.02368 | 0.02370 | 0.02374 |
| Average | 0.02239 | 0.02317 | 0.02323 | 0.02320 | 0.02327 |
| Relative standard deviation /% | 5.544 | 2.353 | 2.312 | 2.392 | 2.361 |
| Max D. C. | 109.40 | 113.26 | 113.70 | 113.68 | 114.27 |

表 6 FY-2C 与 FY-2D 发射前与 2007 年外场定标结果比较

Table 6 Comparison of calibration result between pre-launch and post-launch of FY-2C and FY-2D

| | FY-2C /mV ⁻¹ | | FY-2D /mV ⁻¹ | | |
|--------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|
| | 3A | 1A | 2A | 3A | 4A |
| Pre-launch | 0.01820 | 0.01800 | 0.01816 | 0.01802 | 0.01801 |
| Post-launch | 0.02239 | 0.02317 | 0.02323 | 0.02320 | 0.02327 |
| Relative standard deviation /% | 14.58 | 17.78 | 17.34 | 17.77 | 18.00 |

风云二号静止气象卫星的 AD 转换关系为近似抛物线的几段折线,需要通过 AD 查找表和定标系数确定计数值与等效反射比之间的一一对应关系,生成定标查找表。

3.5 结果讨论

如表 5 中所示,采用了一系列改进方法后,不同野外环境、不同太阳几何位置参数下计算的 4 组定标系数,相对标准偏差在 5.6% (FY-2C) 和 2.4%

(FY-2D) 以内,说明了算法的准确性和稳定性。不过与发射前定标^[24,25]结果相比,相对差异达到 14% (FY-2C) 和 17% (FY-2D) 左右,如表 6 所示。说明仪器存在明显衰减,或是发射前定标方法与在轨定标方法的不同导致定标结果差异较大。两种因素在造成发射前后定标系数的差异中所占权重多少尚在进一步分析中。

4 结 论

利用辐射校正场同步测量数据,采用反射率基法进行 FY-2C/FY-2D 卫星可见光通道辐射定标处理。通过验证并使用 AMBRALS BRDF 模型计算地表方向反射特性修正系数,得到了相对标准偏差在 5.6%(FY-2C)和 2.4%(FY-2D)以内的 4 组定标系数。虽然试验均是在正午展开,由于季节的不同,试验时太阳天顶角大小有明显差异;对应的 AMBRALS BRDF 修正因子在 1.09~1.57 范围内变化,变化幅度达 25.5%(仍未覆盖其可能的最大范围)。即便如此,通过严格推导代表卫星入瞳处辐射能量的等效反射比计算公式,所得多组定标系数均相当接近,说明该方法的准确性和稳定性。

参 考 文 献

- Dinguirard, Magdeline Slater, Philip N. Calibration of space-multispectral imaging sensors — A review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **68**(3):194~205
- S. F. Biggar. In-Flight Methods for Satellite Sensor Absolute Radiometric Calibration [D]. The dissertation of PhD., The University of Arizona., Tucson, US. 1990
- F. J. Ponzoni, J. Zullo, Jr., R. A. C. Lamparelli *et al.*. In-flight absolute calibration of the Landsat-5 TM on the test site Solarde Uyuni [C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(12):2761~2766
- Chen Fuchun, Chen Guilin. Comparison between pre-launch and in-orbit visible onboard calibrations [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2007, **24**(6):709~713
陈福春,陈桂林. FY-2C 发射前后可见光星上定标的比较[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(6):709~713
- P. N. Slater, S. F. Biggar, R. G. Holm *et al.*. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **22**(1):11~37
- Philip N. Slater, Stuart F. Biggar, Kurtis J. Thome *et al.*. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1996, **13**(2):349~359
- Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8):1186~1190
任建伟,万志,李宪圣等. 空间光学卫星的辐射传递特性与校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8):1186~1190
- Zhang Yuxiang, Zhang Guangshun. In-flight vicarious radiometric calibration for VIS-NIR channels of FY-1C satellite sensor at Dunhuang site [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(6):740~747
张玉香,张广顺. FY-1C 卫星可见-近红外各通道在轨辐射定标[J]. *气象学报*, 2002, **60**(6):740~747
- Rong Zhiguo, Zhang Yuxiang, Qiu Kangmu *et al.*. Radiometric calibration on orbit for FY-2B meteorological satellite's visible channels with the radiometric calibration site of Dunhuang [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2004, **15**(3):266~272
戎志国,张玉香,邱康睦等. 利用敦煌辐射校正场对 FY-2B 静止气象卫星进行可见光通道的在轨辐射定标[J]. *应用气象学报*, 2004, **15**(3):266~272
- Y. M. Govaerts, M. Clerici. Evaluation of radiative transfer simulations over bright desert calibration sites [C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(1):176~187
- Y. M. Govaerts, M. Clerici, N. Clerbaux. Operational calibration of the Meteosat radiometer VIS band [C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(9):1900~1914
- Y. M. Govaerts, B. Pinty, M. Taberner *et al.*. Spectral conversion of surface albedo derived from meteosat first generation observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**(1):23~27
- E. Vermote, Y. J. Kaufman. Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, **16**(13):2317~2340
- O. Hagolle, P. Goloub, P.-Y. Deschamps *et al.*. Results of POLDER in-flight calibration [C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3):1550~1566
- E. Vermote, R. Santer, P. Y. Deschamps *et al.*. In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**(18):3409~3429
- R. Santer, F. Zagolski, E. Dilligeard. Radiative transfer code comparison for meris vicarious calibration [C]. *Envisat Validation Workshop Proceedings*, 2002. 9~13
- Hu Xiuqing, Zhang Yuxiang, Qiu Kangmu. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, **7**(6):458~464
胡秀清,张玉香,邱康睦. 采用辐射度基法对 FY-1C 气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标[J]. *遥感学报*, 2003, **7**(6):458~464
- R. ZhiGuo. Calibration method of scanning radiometer on FY-2 satellite in orbit [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2000, **20**(1):67~71
戎志国. FY-2 卫星扫描辐射仪在轨定标方法[J]. *中国空间科学技术*, 2000, **20**(1):67~71
- Liu Jingjing, Rong Zhiguo, Zhang Lijun. BRDF measurement and analysis on Dunhuang radiometric calibration site [R]. Taoyuan: Remote Sensing Symposium on Cross-Strait, 2007
- Li Xiaowen, Gao Feng, Wang Jindi *et al.*. Bi-directional normalized difference vegetation index: concept and application [J]. *Progress In Natural Science*, 2002, **12**(2):115~119
- Hu Baoxin, Lucht, Wolfgang *et al.*. Albedos and angle-corrected NDVI for the Brazilian LBA study area from AVHRR multiangle reflectance inversions [R]. Seattle: The 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1998, **3**:1292~1294
- E. Vermote. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum [M]. 6S User Guide Version 2, 1997
- Zhang Yuxiang. Spectral Data Sets for Satellite Calibration Site and Typical Earth Objects [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. 311~333
张玉香. 卫星校正场地面和典型地物波谱数据集[M]. 北京:气象出版社, 2007. 311~333
- Luo Jun, Yi Weining, Peng Nina. Visible light calibration of FY-2 scanning radiometer based on method of radiation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8):68~71
罗军,易维宁,彭妮娜. 辐射度法的 FY-2 扫描辐射计可见光定标[J]. *光电工程*, 2007, **34**(8):68~71
- Peng Nina, Luo Jun, Yi Weining. Comparisons and analyses of pre-launch field radiometric calibration methods for the visible channel of scanning radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5):597~601
彭妮娜,罗军,易维宁等. 扫描辐射计可见通道发射前外场定标方法对比[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5):597~601