

FY-2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与 在轨辐射定标比较

戎志国 邱康睦 胡秀清 张玉香
(国家气象卫星中心,北京,100086)

摘要 FY-2B 是自旋稳定卫星,红外通道无法进行在轨星上绝对定标. FY-2B 发射前的地面实验室定标方案参照了 FY-2A 在轨环境温度的变化情况,定标结果十分理想. 在轨电子学定标数据修正红外通道的量化关系,得到的在轨定标结果与利用青海湖进行的同步场地辐射定标结果非常接近.

关键词 FY-2, 实验室定标, 在轨定标, 场地辐射定标, 红外, 亮温, 辐亮度.

COMPARISON OF PRE-LAUNCH CALIBRATION IN LAB WITH THE RADIOMETRIC CALIBRATION IN ORBIT FOR FY-2B METEOROLOGICAL SATELLITE'S IR CHANNEL

RONG Zhi-Guo QIU Kang-Mu HU Xiu-Qing ZHANG Yu-Xiang
(National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China)

Abstract The FY-2B is a satellite with the spin stabilized attitude, it is had to make the absolute calibration for its IR channel while the satellite is in orbit. As the satellite's pre-launch Lab calibration had a reference on the in-orbit environment temperature changes of FY-2A, its calibration is ideal. With the correction on quantitatively relationship of the IR channel by the in-orbit electronic calibration, the obtained results are very close to the ones from the simultaneous site radiometric calibration over the Qinghai lake.

Key words FY-2 calibration in Lab, calibration in orbit, radiometric calibration, infrared, brightness temperature, radiance.

引言

FY-2B 于 2000 年 6 月 25 日升空,并顺利定位于预定位置. 7 月 5 日正式发布第一张清晰的可见光云图. 7 月 19 日收到第一张红外、水汽云图. FY-2B 为 FY-2 系列 03 星,上海技术物理研究所为其研制了两套扫描辐射计为 9901、9902. 卫星发射前,分别对可见光通道和红外、水汽通道进行了定标;1999 年 9~10 月在云南天文台对两套可见光通道分别进行了定标;2000 年 1 月 24 日至 2000 年 2 月 16 日在上海航天局 509 所扩建后的 KM-2 真空系统中进行了两套红外、水汽通道的定标,定标实验方案参考了 FY-2A 在轨期间星上环境温度的变化规律.

FY-2B 采用了编号 9902 的扫描辐射计.

为了修正已发射上天的 9902 扫描辐射计红外、

水汽通道的定标结果,在对定标设备进行了无油化改造后,2000 年 12 月对 9901 进行了复定标,以验证定标结果受污染的程度,并得到对在轨的 9902 辐射计的定标结果进行修正的依据.

利用辐射校正场对卫星进行在轨辐射定标,是在轨卫星定标的一种有效手段. 国家卫星气象中心外定标试验队分别于 2000 年 8 月下旬、2001 年 8 月上旬在青海湖外定标场对 FY-2B 卫星红外通道进行了在轨辐射定标试验,取得了较好的结果.

1 FY-2B 红外通道发射前定标和在轨定标

FY-2(03)星的实验室定标参照了 FY-2A 星在轨时的实际环境温度分布的变化,以主镜为主线,设定和控制次镜的几种温度状况,每种状况进行一组标定. 9902 正样产品辐射定标试验在辐冷器二级冷

块温度 95 K 时,共测定了 6 种不同主镜和次镜温度状态.其中第 2、第 3 种状态时,主镜的温度设定相同而只变化次镜的温度,其它部件的温度随主镜温度而变化.100 K 时测定了两组.星上黑体在每种状态中,切入后光路定标一次.标定时的各部件温度见表 1.

根据实验室的定标数据即可进行定标计算.

1.1 定标方法

由测定的目标黑体温度 T 通过积分计算可得出相应的辐亮度 $L_b(\nu, T)$:(为了与外定标结果进行比较,用波数公式计算).

$$L_b(\nu, T) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{2hc^2\nu^3 d\nu}{[\exp(hc\nu/kT) - 1]}, \quad (1)$$

式(1)中 h 是普朗克常数, c 是光速,而 k 是玻尔兹曼常数.波数 $\nu_1 = 769 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_2 = 1000 \text{ cm}^{-1}$.

目标黑体的发射率 $\varepsilon(\nu)$ 和辐射计的光谱响应函数 $\Phi(\nu)$ 由研制单位提供,辐亮度 $L_d(\nu, \varepsilon, T)$ 可以写为

$$L_d(\nu, \varepsilon, T) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \Phi(\nu) \varepsilon(\nu) \frac{2hc^2\nu^3 d\nu}{[\exp(hc\nu/kT) - 1]}, \quad (2)$$

发射率 $\varepsilon(\nu)$ 为常数,等于 0.999.

对于 FY-2B 红外、水汽通道的通道波谱范围, ν_i 是连续的.式(2)的积分可以简化为 $L_b(T)$ 对 ν 的求和,即

$$L_d(T) = \sum_{\nu_i=\nu_0}^{\nu_{n-1}} \Phi(\nu_i) \varepsilon \frac{2hc^2\nu^3(\nu_{i+1} - \nu_i)}{[\exp(hc\nu_i/kT) - 1]}, \quad (3)$$

对式(3)进行归一化处理,将得到等效辐亮度 $L_c(T)$

$$L_c(T) = \frac{L_d(T)}{\int_{\nu_0}^{\nu_n} \Phi(\nu) d\nu}$$

表 1 9902 六组定标状态及星上黑体温度(单位 K)
Table 1 Six set of calibration status of 9902 and the black body temperature of satellite

| 序号 | 辐冷温度 | 主镜温度 | 次镜温度 | 折镜温度 | 定标镜温度 | 星上黑体温度 |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 95.24 | 275.2 | 289.3 | 275.6 | 267 | 280.3 |
| 2 | 95.24 | 278.9 | 282.2 | 278.53 | 269.57 | 280.6 |
| 3 | 95.24 | 278.08 | 288.15 | 278.41 | 269.55 | 281.31 |
| 4 | 95.24 | 280.08 | 289.15 | 280.37 | 270.93 | 280.52 |
| 5 | 95.25 | 282.12 | 292.15 | 282.39 | 272.71 | 280.98 |
| 6 | 95.25 | 285.2 | 293.4 | 285.4 | 275.4 | 281.12 |
| 7 | 99.89 | 278.13 | 288.1 | 278.45 | 269.4 | 280.57 |
| 8 | 99.89 | 281.15 | 290.92 | 281.43 | 272.63 | 280.79 |

$$= \frac{L_d(T)}{\sum_{\nu_0}^{\nu_{n-1}} \Phi(\nu_i)(\nu_{i+1} - \nu_i)} \quad (4)$$

式(4)中 $L_c(T)$ 的单位是 $\text{MW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$.

处理 9902 实验室定标数据即可得到目标辐亮度与输出电压的关系.辐亮度 L 与电压 U 为线性关系,见式(5)

$$L = A \times U + B, \quad (5)$$

其中 A, B 为拟合系数.

根据卫星研制部门提供的 FY-2(03) 扫描辐射计红外和水汽通道 A/D 量化关系,可以得到计数值与电压的关系,见式(6)和图 1.它是发射前设定的电路输出量化关系

$$U = AA \times DC + BB, \quad (6)$$

其中斜率 $AA = 19.644$, 截距 $BB = 119.89$, U 为电压, DC 为计数值.

从式(5)和式(6)可以看出,计数值与辐亮度也是线性关系,在轨定标确定的就是两者之间的关系.

$$L = \alpha \times DC + \beta. \quad (7)$$

卫星在轨时各通道每次扫描观测的头几行需要测定有关标定信息,包括电定标阶梯、黑体计数值和空间计数值等.此时的电定标阶梯是卫星在空间环境中得到的,用它与电压间设定的关系,可以得到卫星电路输出的实际量化关系.红外 A 增益第 08 级时,其各阶梯电压输出值为:0, 0.589, 1.107, 1.593, 2.079, 2.564.图 2 为 FY-2B 在轨的电定标过程图,红外与水汽通道的阶梯计数值基本一样.阶梯电压与计数值之间的关系是图 1 中的短线,可以看出阶梯的量化关系与地面给定的 A/D 量化关系的斜率一致,而截距约相差为 120 mV(约 6 个计数值).在

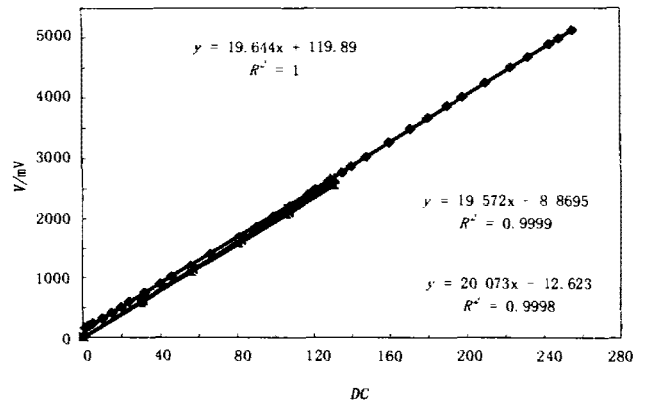


图 1 FY-2(03) 红外与水汽通道 A/D 量化及在轨电定标的关系图

Fig. 1 The A/D quantitatively relationship of the IR & WV channels and the electronic calibration in -orbit for FY-2(03)

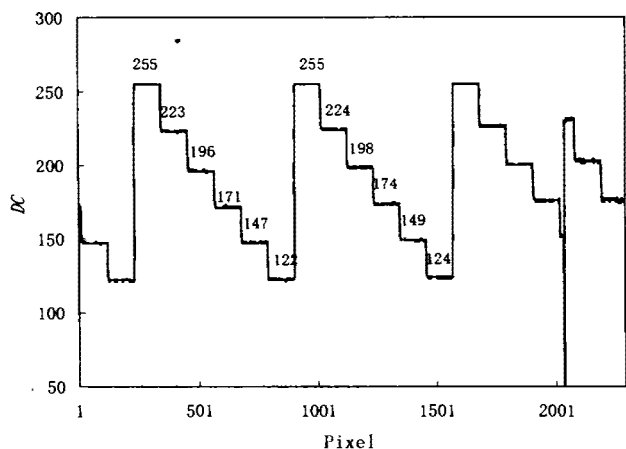


图2 FY-2B 红外在轨电定标阶梯图

Fig. 2 The FY-2B's stairs of the electronic calibration in-orbit

轨电定标量化是卫星输出(计数值)的真实反映。

FY-2B 电定标阶梯的输出非常稳定,在轨一年多未变。用 2000 年 7 月红外、水汽通道开通不久的一组阶梯确定的量化关系,系数为:19.572,截距:-8.869。我们以此作为定标的量化依据。

当 $DC = 0, 1, 2, \dots, 254, 255$ (反向后为:255, 254, $\dots, 2, 1, 0$) 将得到一组电压值 U_i , 代入式(5)即可得到一组辐亮度值 L_i 。由光谱响应函数可以求得通道的中心波数 ν_0 。由辐亮度 L_i 及中心波数,可以反演出通道的目标亮温 T_i 。

$$T_i = hc\nu_0/k/\ln(1 + 2\epsilon hc^2 \nu_0^3/L_i), \quad (8)$$

用中心波数反演出的目标亮温有一定的误差,将此温度 T_i 代入式(3)和式(4),可得一幅亮度 L_i' , 比较 L_i' 与 L_i , 如二者相差超出误差范围,则给 T_i 一个修正量 ΔT , 使 $T_i' = T_i + \Delta T$, 再重复以上过程,直

至得到的目标辐亮度 L_i' , 达到精度要求。

1.2 系统误差修正

由于 FY-2(03) 星的两套扫描辐射计在实验室定标时,发生了真空泵油泄漏汽化,使得真空容器中的定标器主镜受到污染。两套辐射计受污染的过程是一样的,所以,为了修正已发射上天的 9902 扫描辐射计红外、水汽通道的定标结果,在对定标设备进行了无油化改造后,2000 年 12 月对 9901 进行了重新定标,以验证定标结果受污染的程度,并得到对在轨的 9902 辐射计的定标值进行修正的依据。表 2 为上海技物所提供的 9901 两次红外、水汽通道实验室定标得到的定标曲线斜率变化及建议使用的修正量。

9901 与上天的 9902 在实验室标定的次数及实际环境不完全一样,且两套辐射计的 AB 两机也不完全相同及对应,因此,用 9901 的结果修正 9902 时只能用一个平均值:在红外通道的 2.56%,在水汽通道为 1.82%!不同温度点的辐亮度变化将引起不同的温度差,对于红外通道,2.56% 的系统差最大能引起 2K 的误差。

利用系统差可以修正在轨辐射计红外、水汽通道的定标结果,得到定标系数、截距(反向后),以及定标查找表。95K 的六组、100K 两组的定标系数、截距见表 3。

2 利用辐射校正场——青海湖对 FY-2B 红外通道进行在轨绝对辐射定标

在进行了严格的科学测量和分析后,中国遥感卫星辐射校正场选定位于青藏高原的青海湖水面作为遥感卫星热红外通道的辐射校正场。

表 2 9901 两次红外、水汽通道实验室定标曲线斜率变化及建议使用的修正量

Table 2 The slope change of calibration curve on IR & WV Lab calibration of 9901 in Lab, and the suggested correction

| 状态 | 斜率变化率(%) | | 红外建议修正值(%) | 斜率变化率(%) | | 水汽建议修正值(%) |
|-----|----------|-------|------------|----------|-------|------------|
| | 红外(主) | 红外(备) | | 水汽(主) | 水汽(备) | |
| 1 | 3.39 | 2.60 | 2.99 | 1.90 | 1.62 | 1.76 |
| 2 | 2.94 | 2.30 | 2.62 | 1.80 | 2.08 | 1.94 |
| 3 | 2.95 | 2.05 | 2.50 | 1.65 | 1.94 | 1.80 |
| 4 | 2.95 | 2.11 | 2.53 | 1.62 | 1.27 | 1.44 |
| 5 | 2.80 | 2.37 | 2.59 | 2.05 | 2.31 | 2.18 |
| 6 | 2.87 | 2.80 | 2.83 | 2.16 | 1.75 | 1.95 |
| 7 | 2.24 | 2.20 | 2.22 | 1.17 | 1.92 | 1.54 |
| 8 | 1.95 | 1.93 | 1.94 | 1.52 | 1.80 | 1.66 |
| 9 | 2.67 | 2.97 | 2.82 | 1.79 | 2.40 | 2.09 |
| 平均值 | 2.75 | 2.37 | 2.56 | 1.74 | 1.90 | 1.82 |

表 3 利用星上电定标及系统修正过的 FY2B 在轨定标结果
Table 3 FY-2B's in-orbit calibration result that corrected by the in-orbit electronic calibration

| 辐冷温度 | 序号 | 系数 | 截距 | 主镜温度 K | 次镜温度 K |
|------|----|---------|--------|--------|--------|
| 95K | 1 | -0.5951 | 148.43 | 275.2 | 289.3 |
| | 2 | -0.6028 | 150.47 | 278.9 | 282.2 |
| | 3 | -0.6032 | 150.57 | 278.08 | 288.15 |
| | 4 | -0.6099 | 152.12 | 280.08 | 289.15 |
| | 5 | -0.6139 | 153.3 | 282.12 | 292.15 |
| | 6 | -0.6254 | 156.27 | 285.2 | 293.4 |
| 100K | 1 | -0.6589 | 164.96 | 278.13 | 288.1 |
| | 2 | -0.6668 | 167.06 | 281.15 | 290.92 |

1994 年、1999 年对青海湖进行的综合考察表明,青海湖的水面辐射特性和地区大气条件符合遥感卫星热红外通道的定标要求.青海湖面积 4473 km²,环湖周长 360 km.湖面东西长约 109 km,南北宽约 65 km,呈椭圆形.湖水平均约深 19 m,最深处达 32.8 m,蓄水量达 105Gm³,湖面海拔 3196 m.水面温度水平梯度小于 0.12℃,水温分布十分均匀,是一个天然的红外辐射目标源.青海湖地区属于较高寒半干燥草原气候,大气干洁,卫星辐射信号大气订正量较小.

2000 年、2001 年在青海湖对 FY-2A、FY-2B 进行了水面辐射同步测量,同时在岸边释放探空气球、测量大气温湿压风廓线.测量仪器包括了测量水面辐亮度的 CE-312 便携式热红外辐射计、BOMEM MR-154 中近红外傅里叶变换光谱仪及其它各种辅助仪器.

2.1 辐射定标原理

地球观测卫星对地观测时,卫星热红外辐射计入瞳处的单一波长(在红外波段用波数 cm⁻¹)的辐亮度 R_s 可表示为

$$R_s(\nu) = R_w(\nu)\tau_a(\nu) + \int_0^{\infty} B[T(z)] \frac{\partial \tau_a}{\partial z} dz, \quad (9)$$

式(9)中 R_w 为地面目标向上光谱辐亮度,这里指青海湖水体光谱辐亮度, ν 为波数, τ_a 为大气光谱透过率, $B[T(z)]$ 为大气普朗克函数,将光谱辐亮度与卫星光谱响应函数乘积积分,就得到卫星某一通道 I 的辐亮度.

$$R_{si} = R_{wi} \cdot \tau_{ai} + R_{ai}, \quad (10)$$

式(10)中 R_{si} 是卫星入瞳处辐亮度, R_{wi} 为模拟卫星通道野外热红外辐射计 CE312 在水面测量的通道辐亮度, τ_{ai} 为卫星通道大气透过率, R_{ai} 为卫星观测路径大

气程辐射.

利用辐射传输模式 MODTRAN3.7,输入卫星过境时刻大气探空数据和卫星观测几何路径,便可以计算出卫星观测路径大气透过率和大气程辐射.这两项直接影响卫星观测的地面目标信号.

卫星通道辐亮度与卫星计数值关系为

$$R_{si} = G_i \cdot DC_i + I_i, \quad (11)$$

式(11)中 DC_i 为同步测量时卫星扫描青海湖测量点的红外通道计数值, G_i 为卫星通道 i 定标斜率, I_i 为截距.要得到定标系数 G_i 和 I_i ,必须有两组 R_{si} 和 DC_i ,卫星观测青海湖和冷空间会得到两组计数值,冷空间的辐亮度为 0.

2.2 定标结果

2000 年 FY-2B 的工作状态正常,8 月下旬辐冷二级冷块温度控制在 95 K.2001 年 8 月上中旬 FY-2B 的辐冷二级冷块温度因降不到 95 K,只能控制在 100 K.两年的场地辐射定标结果不能比较.表 4 中两年连续几天的数据具有较好的重复性,我们取其平均值:2000 年的斜率 -0.5808,截距 148.1095;2001 年的斜率 -0.64035,截距 163.28635.卫星在轨期间,其环境温度变化较小,从遥测数据可知:2000 年 8 月 24 日星上主镜的温度为 5.7863℃ (278.9463 K),次镜温度为 15.9241℃ (289.0841 K),与实验室定标 95 K 的第三组最近(见表 3);2001 年 8 月 13 日主镜温度为 7.6643℃ (280.8243 K),次镜温度为 14.2364℃ (287.3964 K),与实验室定标 100 K 的第一组接近(见表 3).图 3 为实验室定标与青海湖场地辐射定标结果的比较图,95 K 时两线斜率相差高端的差别较大,相当的亮温不到 2 K;

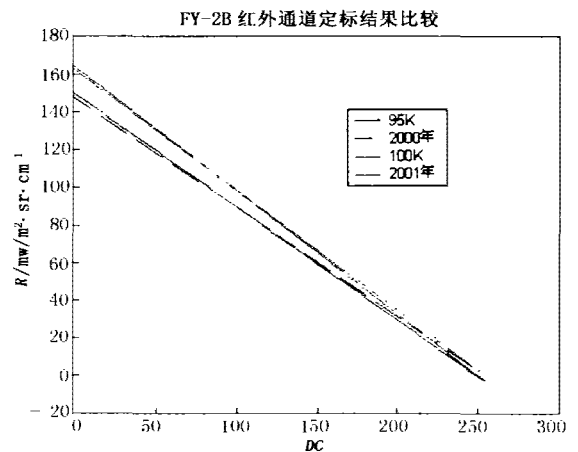


图 3 FY2B 红外通道实验室定标与青海湖场地定标结果比较图

Fig. 3 The contrast for FY-2B's IR calibration results from Lab and Qinghai-lake site

表 4 2000 年、2001 年 FY-2B 卫星利用青海湖目标得到的定标斜率和截距(斜率($\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$)/DC, 截距 $\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$)

Table 4 The FY-2B's slopes and intercepts from radiometric calibration over the Qinghai-lake's site

| 2000 年定标结果(95 K 辐冷) | | | | | | |
|----------------------|---------|----------|----------|---------|-----|--|
| 日期 | 斜率 | 截距 | 亮温 | 入瞳辐亮度 | 计数值 | |
| 2000-8-24 | -0.5768 | 147.0828 | 286.8461 | 96.3248 | 88 | |
| 2000-8-26 | -0.5868 | 149.6321 | 287.5529 | 97.4076 | 89 | |
| 2000-8-28 | -0.5833 | 148.7357 | 287.5527 | 97.4073 | 88 | |
| 2000-8-30 | -0.5764 | 146.9872 | 287.5578 | 97.4151 | 86 | |
| 2001 年定标结果(100 K 辐冷) | | | | | | |
| 2001-8-11 | -0.6375 | 16265633 | 288.4650 | 98.8130 | 100 | |
| 2001-8-13 | -0.6432 | 164.0094 | 288.6167 | 99.0488 | 101 | |

100 K 时,两线更为相近,而此时卫星已在轨一年多.如果两年辐冷温度一致,还可计算出一年间红外通道探测器的性能衰减.

青海湖场地辐射定标为卫星在轨绝对定标.由于 FY-2B 为自旋稳定卫星,其红外通道的星上黑体定标无法与目标同光路,只能定期地从后光路插入进行定标——不是绝对定标.实验室定标加上星上电子学标定的量化关系得到的 FY-2B 红外通道的定标结果与青海湖定标结果如此接近,说明 FY-2B 红外探测器性能非常稳定,同时也验证了实验室定标方法科学有效,定标数据测量结果准确.因 FY-2B 红外通道的定标精度为 2 K,两年的场地定标结果表明,红外通道探测器达到了设计的定标精度要求.

REFERENCES

- [1]《THE GMS USERS' GUIDE》second edition march 1989; Tokyo, Published by Japanese meteorological satellite center.
- [2] WANG Zong-Ming, HE Xin-Xiang, SUN Dian-Qing. *Applied infrared Spectroscopy*. Beijing: Oil Industry Press (王宗明,何欣翔,孙殿卿 实用红外光谱学.北京:石油工业出版社), 1990
- [3] Geoffrey Goodrum, Katherine B Kidwell, Wayne Winston. NOAA KLM User's Guide; Section 7; Calibration of NOAA KLM Instruments. September 2000 Revision
- [4] Michael W, Michael J, Fulton N, et al. Operational Calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite -8 and -9 Imagers and Sounders. *Applied Optics*, 1997, **36**: 6895 — 6904
- [5] TAN Shi-Xiang, CHEN Qing-Lian, Wang Zhen-Zhan, et al. *Measuring and Analysing Water Optical Properties of Qinghai Lake*. Beijing: Ocean Press. (谭世祥,陈清莲,王振占,等.青海湖水体光学特性测量与分析.中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编.北京:海洋出版社), 2001
- [6] RONG Zhi-Guo, HANG Yu-Xiang. *Channel's Thermal-infrared Radiometer Measured The Water Surface Temperature on Qinghai Lake*. Beijing: Ocean Press (戎志国,张玉香.通道式热红外辐射计 CE-312 青海湖水面温度的测量.中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编.北京:海洋出版社), 2001
- [7] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, ZHANG Li-Jun, et al. *BOMEM MR154 FT-Spectroradiometer Measured The Water Surface Temperature on Qinghai Lake*. Beijing: Ocean Press (戎志国,张玉香,张立军,等.玻曼 MR-154 中近红外傅里叶变换光谱辐射仪青海湖水面温度测量.中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编.北京:海洋出版社), 2001
- [8] WANG Wei-He, RONG Zhi-Guo, HU Xiu-Qing, et al. *Radiometric Calibration for The Thermal Channels of FY-1C and FY-2B*. Beijing: Ocean Press, (王维和,戎志国,胡秀清,等. FY-1C 和 FY-2B 热红外通道的辐射定标.中国遥感卫星辐射校正场科研成果论文选编.北京:海洋出版社), 2001
- [9] HU Xiu-Qing, RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu, et al. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using qinghai lake. *Space Science Transaction*. (胡秀清,戎志国,邱康睦,等.利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 和 FY-2B 气象卫星热红外通道进行绝对辐射定标.空间科学学报), 2001, **21**(4): 370 — 380
- [10] RONG Zhi-Guo. Calibration method of scanning radiometer on FY-2 satellite in orbit. *Chinese Space Science and Technology*(戎志国. FY-2 卫星扫描辐射仪在轨定标方法.中国空间科学技术), 2000, **20**: 67 — 71