

文章编号:1001-9014(2007)02-0097-06

利用南海水面开展我国静止气象卫星 红外通道在轨辐射定标

戎志国^{1,3}, 张玉香¹, 贾凤敏², 谭世祥²,
刘京晶¹, 张艳¹, 刘诚¹, 张鹏¹

(1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心, 北京 100081;
2. 国家海洋技术中心, 天津 300111; 3. 北京大学 物理学院, 北京 100871)

摘要:中国遥感卫星辐射校正场以青海湖水面作为遥感卫星红外探测通道外场辐射定标的场地. 我国静止气象卫星风云二号(FY-2)系列是自旋稳定卫星, 其红外通道无法进行在轨时的星上绝对定标, 而青海湖对于位于东经105°赤道上空的FY-2卫星来说, 卫星天顶角有36°, 超过了外场辐射校正测量规范要求. 本文介绍了利用我国南海海面水体辐射, 进行与静止气象卫星的同步测量试验, 开展卫星红外通道在轨外场辐射定标处理的可行性研究. 在分别对FY-2B与FY-2C的测量数据处理后, 初步确定我国南海海面可以作为我国静止气象卫星在轨辐射定标的场地.

关键词:自旋稳定; 静止气象卫星; 辐射定标; 红外通道; 中国遥感卫星辐射校正场

中图分类号:P414.4 **文献标识码:**A

ON-ORBIT RADIOMETRIC CALIBRATION OF FENGYUN GEOSTATIONARY METEOROLOGICAL SATELLITE'S INFRARED CHANNELS BASED ON SEA-SURFACE MEASUREMENTS IN THE SOUTH CHINA SEA

RONG Zhi-Guo^{1,3}, ZHANG Yu-Xiang¹, JIA Feng-Min², TAN Shi-Xiang²,
LIU Jing-Jing¹, ZHANG Yan¹, LIU Cheng¹, ZHANG Peng¹

(1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China;
2. National Oceanic Technology Center, Tianjin 300111, China;
3. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The water surface of Qinghai Lake which is one of China Radiometric Calibration Site of remote sensing satellite (CRCS) is used as the field of radiometric calibration for the infrared channel of remote sensing satellites. As our spin-stabilized geostationary meteorological satellites, FY-2's infrared channel can't realize an absolute calibration on orbit. Since FY-2 is located at the equator of 105 degrees east longitude to Qinghai Lake, the satellite zenith angle is 36 which is larger than the measurable range of the criterion for radiometric calibration site. This study describes a method to calibrate the infrared channels of geostationary meteorological satellites based on the simultaneous measurement of upwelling sea-surface radiance in the South China Sea. The data analysis for FY-2B and FY-2C shows that the South China Sea is a suitable radiometric calibration site for geostationary meteorological satellites.

Key words: spin-stabilized; geostationary meteorological satellite; radiometric calibration; infrared channel; CRCS

引言

中国遥感卫星辐射校正场(CRCS)包括敦煌戈

壁滩可见光近红外辐射校正场(地理位置为40°4' ~ 40°15'N, 94°11.5' ~ 94°26.5'E)和青海湖热红外辐射校正场(地理位置为36°41' ~ 36°45'N, 100°

收稿日期:2006-04-06, 修回日期:2006-09-27

Received date: 2006-04-06, revised date: 2006-09-27

基金项目:国家自然科学基金(40675014)资助项目

作者简介:戎志国(1964-),男,江苏丹阳人,正研级高级工程师,主要从事遥感卫星辐射定标工作.

22' ~ 100°30'E)^[1]. 自从 1999 年校正场建设运行以来, 每年均为气象卫星 (FY-1C、FY-2B、FY-1D、FY-2C)、资源卫星 (CBERS-1)、海洋卫星 (HY-1)、神舟飞船 (SZ-3)、美国卫星 (EOS-AQUA、EOS-TERRA、NOAA-16/17/18) 等遥感卫星进行同步观测试验, 为卫星传感器可见光、红外通道开展了在轨场地绝对辐射定标工作。

由于 2 个外定标场均位于我国西北, 对于象 FY-1 的极轨卫星, 由于其轨道的漂移, 在一周到 10 天左右的时间里总有卫星轨道从场地上空通过, 也就是说卫星对于场地的天顶角总能小于一定量 (如外场定标规范要求卫星天顶角小于 20°)。但是, 对于位于东经 105° 赤道上空的我国静止气象卫星 FY-2, 敦煌和青海湖处的卫星天顶角达到 47° 和 36°。可见光波段的外场定标时, 戈壁滩双向反射特性对测量数据的修正有 20% 以上^[2]。对于红外波段, 利用青海湖外场辐射定标不仅有湖面的方向特性影响, 而且青海湖在冬季湖面结冰, 前后有数月不能用于有关卫星传感器的场地辐射定标。

另外, 由于我国现在业务使用的风云静止气象卫星 FY-2 系列卫星采用的是自旋稳定方式, 其星上定标黑体无法安装在探测光路的最外端来进行在轨时的星上绝对定标。因此, 对于某些传感器特别是静止气象卫星红外通道的传感器, 替代定标 (如: 外场辐射定标^[3,4]、与其它高定标精度卫星传感器的相对定标^[5,6]等) 将是提高卫星定量遥感应用的有效途径。寻找比青海湖更加适合 FY-2 开展辐射定标的场地是本文将要讨论的主要内容。

2003 年 2 月利用“神舟四号”多模态微波传感器对地观测试验的机会, 对南海海域的海面进行了多时段、大面积的测量, 获取了丰富的海面辐射资料。借此机会, 为 FY-2B 卫星红外通道 (红外长窗区通道) 进行了同步测量和定标数据处理。2005 年 10 月, 为 FY-2C 卫星红外通道 (2 个分裂窗通道) 进行了同步测量和数据处理工作。2 次试验均获得了较好的结果, 为研究确定南海海面开展我国静止气象卫星在轨辐射定标提供了科学依据。

测量海水辐射的仪器为法国 CIMEL 公司生产的 CE-312 通道式热红外辐射计, 通过同期进行的标准黑体定标, 可以反演出海表辐亮度和亮温。在收集了有关大气探空资料后, 利用辐射传输模式 MODTRAN 可以计算出海水热辐射通过大气传递到卫星入瞳处的辐亮度; 在获取了 FY-2B、FY-2C 卫星相同时间的红外云图中相同位置海面的计数值后, 即可

进行在轨场地绝对定标处理, 获得红外通道的定标系数。

2 CE-312 热红外辐射计目标测量、黑体定标与目标反演原理

CE-312 热红外辐射计是用于测量地物目标的便携式低噪音红外辐射计。它包括 2 个主要部分: (1) 由探测器和光学系统组成的光学头; (2) 数据收集、显示和储存的电子学部分。原设计成一个宽波段滤光片 8 ~ 14 μm 和 3 个带通滤光片 8.2 ~ 9.2 μm, 10.3 ~ 11.3 μm, 11.5 ~ 12.5 μm。为了与风云卫星同步测量, 我们购买的这台增加了一个长窗区 10.5 ~ 12.5 μm 滤光片。5 个滤光片的透过率曲线见图 1。

用 CE-312 测量到的是计数值, 从计数值确定目标的辐亮度需要在测量过程期间进行标准黑体的定标测量。

下面给出辐射计测量数据处理及定标方法。

目标或反射镜表面发射的辐亮度, 由其亮温、发射率和普朗克函数确定。一个黑体的温度为 T , 它在波长为 λ 和 $(\lambda + \Delta\lambda)$ 之间的辐亮度 $L_{bb}(\lambda, \Delta\lambda, T)$ 由普朗克函数积分得到

$$L_{bb}(\lambda, \Delta\lambda, T) = \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \frac{2hc^2 d\lambda}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \quad (1)$$

其中 h 是普朗克常数, c 是光速, 而 k 是玻尔兹曼常数。

假定目标或反射镜与仪器之间的大气透过率是一致的, 方程 (1) 可以修改为计算目标或反射镜到达探测器的辐亮度 $L_d(\lambda, \Delta\lambda, \varepsilon, T)$, 其中加上了目标或反射镜的发射率 $\varepsilon(\lambda)$ 和辐射计的光谱透过率 $\tau(\lambda)$:

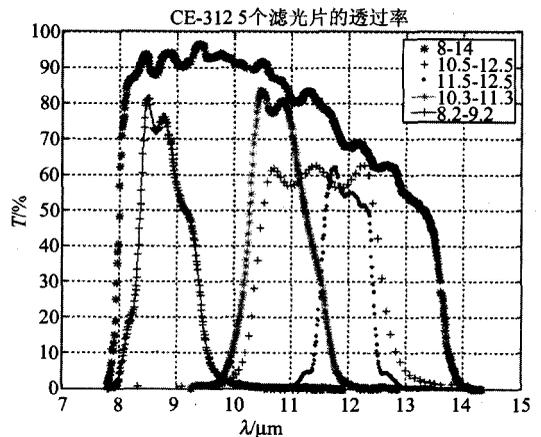


图 1 CE-312 热红外辐射计滤光片透过率示意图
Fig. 1 Channel spectral transmittance of CE-312 thermal infrared radiometer

$$L_d(\lambda, \Delta\lambda, \varepsilon, T) = \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \tau(\lambda) \varepsilon(\lambda) \frac{2hc^2 d\lambda}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \quad (2)$$

不管是在实验室还是在场地,目标或反射镜与辐射计的距离都在数米内,对于所定波段空气的影响是可以忽略的.对于给定的波段, λ_i 是连续的,而 τ 不等于0. ε 是可知的.式(2)的积分可以简化为 $L_d(\varepsilon, T)$ 对 λ 的求和

$$L_d(\varepsilon, T) = \sum_{\lambda_i=\lambda_0}^{\lambda_{n-1}} \tau(\lambda_i) \varepsilon(\lambda_i) \frac{2hc^2 (\lambda_{i+1} - \lambda_i)}{\lambda_i^5 [\exp(hc/\lambda_i kT) - 1]} \quad (3)$$

其中 $\lambda_n - \lambda_0 = \Delta\lambda$.对于每个通道光谱透过率是已知的,因此计算在探测器处的 $L_d(\varepsilon, T)$ 可以得到每个通道的辐亮度.

对式(3)进行归一化处理,将得到等效辐亮度 $L_e(\varepsilon, T)$

$$L_e(\varepsilon, T) = \frac{L_d(\varepsilon, T)}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \tau(\lambda) d\lambda} = \frac{L_d(\varepsilon, T)}{\sum_{\lambda_i=\lambda_0}^{\lambda_{n-1}} \tau(\lambda_i) (\lambda_{i+1} - \lambda_i)} \quad (4)$$

这里 $L_e(\varepsilon, T)$ 的单位是 $w/(m^2 sr \mu m)$,也可波长单位改为波数(cm^{-1}),这样 $L_e(\varepsilon, T)$ 的单位将是 $mW/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$.

事实上,探测到的信号 V_{sig} 包含了目标信号 V_t 和辐射计自身发射的信号 V_r ,加上电子漂移信号 V_{offset} .探测到的信号可以写成

$$V_{sig} = V_t + V_r + V_{offset} \quad (5)$$

同时观测到的内部参考源信号为

$$V_{sig}^m = V_t^m + V_r + V_{offset} \quad (6)$$

式(5)和式(6)相减,将得到测量与内部参考信号的关系,其间已消除了电子漂移信号

$$V_{sig} - V_{sig}^m = V_t + V_t^m \quad (7)$$

热敏探测器的原理使我们知道了黑体与内部镜子的等效辐亮度之差与测量到的信号输出之差是成比例的.其比例系数通过对辐射计定标得到.

在测量目标之前,先进行黑体定标.估计海水温度,以此温度为中心点,上下分别选择几个均匀间隔的温度.依次将黑体温度调准,将辐射计探头对准黑体源辐射输出口,黑体温度稳定后,即可进行定标测量.黑体源是美国 Mikron 仪器公司生产的 M340 型号,其在 4min 内可达任何设定的温度点.

CE-312 测量到的黑体辐射在 5 个通道的计数值及其它一些信息传输到微机后,可以分别读出计数值 DC_s 、辐射计内部探点的温度值及计数值 DC_m .由此可以得到黑体、镜子的辐亮度与黑体、镜子的计数值的关系式

$$L_s - L_m = A(DC_m - DC_s) + B \quad (8)$$

其中 L_s 和 L_m 是由式(4)得到的黑体源和镜子的等效辐亮度.A、B 可用最小二乘法拟合求得.

目标测量选择了仪器的自动测量模式,即每次测量:5 个通道分别进行 4 次重复测量,测量间隔设置为 5min.仪器架设前后,分别对仪器进行黑体定标.同时用 GPS 进行测点定位,用表层水温表测量水温.

从测量目标输出文件中读出镜子与目标 5 个通道的计数值 DC_m 、 DC_s ,以及探头内金板的温度 T_m .用式(3)和式(4)分别求出 5 个通道的 T_m 时的辐亮度 L_m ,由式(8)求得 5 个通道的目标辐亮度 L_s .对于 5 块滤光片,通过它们的光谱透过率,可以分别求得其中心波长 λ_0 为:10.54478、11.96805、10.80438、8.830828、11.55825 μm .由已求得的 L_s 及中心波长 λ_0 ,可以分别反演出各通道的目标亮温 T_s .

$$T_s = hc/\lambda_0 k / \ln\left(\frac{1 + 2\varepsilon hc^2}{\lambda_0^5 \cdot L_s}\right) \quad (9)$$

其中 ε 是发射率,对于水面近似为 1.

用中心波长反演出的目标亮温有一定的误差,将此温度 T_s 代入式(3)和式(4),可得一辐亮度 L'_s ,比较 L'_s 与 L_s ,如二者相差超出误差范围,则给 T_s 一个修正量 ΔT ,使 $T'_s = T_s + \Delta T$,再重复以上过程,直至得到的目标辐亮度 L'_s 达到精度要求.

对于 FY-2B,只有 1 个长窗区热红外通道(10.5 ~ 12.5 μm);FY-2C 有 2 个红外分裂窗通道(10.3 ~ 11.3 μm , 11.5 ~ 12.5 μm).

3 利用南海海面对 FY-2 系列卫星红外通道进行在轨辐射定标

3.1 定标方法

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 ν (用波数 cm^{-1})的辐亮度 L_s 可表示为

$$L_s(\nu) = L_w(\nu) \tau_a(\nu) + \int_0^{\infty} B[T(z)] \frac{\partial \tau_a}{\partial z} dz \quad (10)$$

L_s 是卫星入瞳处辐亮度, L_w 为 CE-312 红外通道亮温按海水辐射光谱计算出的辐亮度, 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.

利用辐射传输模式 MODTRAN,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.其中 FY-2B 探空资料为相近时间香港探空站的探测资料,FY-2C 探空资料为珠海探空站的数据.

将光谱辐亮度 L_s 与卫星光谱响应函数 ϕ (见图2) 乘积积分并归一, 可得到卫星红外探测器探测到的辐亮度 L_d ,

$$L_d = \frac{\int L_s \cdot \phi \cdot dv}{\int \phi \cdot dv}, \quad (11)$$

其中积分区间为 FY-2B 红外通道响应范围: (10 ~ 13 μm , 1000 ~ 769 cm^{-1}), FY-2C 2 个红外分裂窗通道响应范围: (IR1a, 9.54 ~ 12.76 μm , 1048 ~ 784 cm^{-1} ; IR2a, 10.02 ~ 13.44 μm , 998 ~ 744 cm^{-1}).

卫星通道辐亮度与卫星计数值关系为

$$L_d = G \cdot DC + I, \quad (12)$$

DC 为同步测量时 FY-2B/C 卫星扫描海面测量点的红外通道计数值, G 为卫星通道定标系数, I 为截距.

3.2 FY-2B 卫星 2003 年定标结果

由于 2003 年 2 月上旬南海上空云多, 虽然对神舟四号微波辐射计的同步测量影响较小, 但要利用海面测量资料进行 FY-2B 红外通道的在轨定标, 必须找到晴天测量数据与 FY-2B 红外云图匹配, 同时由于探空站只在世界时 0h 和 12h 测量. 综合各种因素, 在 2 月上旬只有 2 月 8 日世界时 0h 的资料符合要求.

2003 年 2 月 8 日世界时 0h 测量船位于 (21°01' 54"N, 115°50'03"E) 附近海域, CE-312 测量反演出的海面亮温为 21.94°C (同时用水温表测量的水温为 22.2°C, 辐射计测量反演的亮温与之十分接近). 利用香港同时间的探空资料进行辐射传输计算, FY-2B 红外通道探测到的海面辐射亮度为 103.374 ($\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$). FY-2B 当日 0h 开始的卫星红外通道云图中, 南海海域是晴空, 测量地点的计数值为 75 (红外通道输出反向, 255 对应 0 输出).

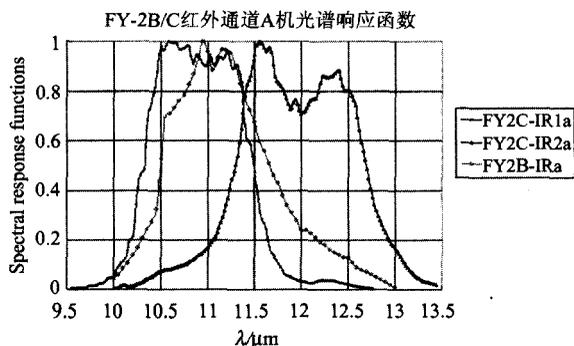


图2 FY-2B/C 卫星红外通道光谱响应示意图
Fig.2 FY-2B/C satellites infrared channels spectral response functions

要得到定标系数 G 和 I , 必须有高低 2 个 L_s 和 DC , 一组为海水辐射和卫星计数值, 另一组为卫星观测冷空间得到的计数值, 冷空间的辐亮度为 0. 利用式 (12) 进行计算, 确定定标系数: $G = -0.5743$, $I = 146.4465$.

事实上, 由于在扫描辐射计挡光筒的结构设计和材料选择方面 FY-2B 与 FY-2A 不同, FY-2B 卫星在轨后其红外通道云图的四周空间出现了较为严重的噪声. 空间零输出对应红外云图的计数值应为 255, 但噪声的影响使得地球外空间出现了低于 255 的值, 特别是西北角出现了最小 225 的值 (相当于噪声有 30 个计数值的输出). 因为在轨辐射定标是两点定标, 高温点取海面, 低温点取空间值. 因此低点 (计数值较大) 的选取就直接影响到定标结果, 如考虑到噪声的影响取 225, 则经过计算得到的定标系数为 -0.68916, 截距为 155.06. 这个结果与利用 NOAA 卫星红外通道对 FY-2B 红外通道进行的相对定标^[5] 结果一致. 同时, 对图像中噪声和杂散光的分布分析^[7], 也证明在自旋稳定卫星光路设计中难以避免杂散光的影响.

FY-2B 广播的展览图像中红外通道在轨定标采用考虑了噪声影响的处理结果.

3.3 FY-2C 卫星 2005 年定标结果

2005 年 10 月 22 日在北部湾海域开展了海面辐射测量. 利用北海市气象局观测站探空数据, 进行辐射传输计算.

FY-2C 红外通道数据从 B 星的 8 比特 (最大数 255) 提高到了 10 比特 (最大数 1023). 同时, FY-2C 扫描辐射计的杂散光 (噪声) 得到了很好解决.

表 1 为 CE-312 测量数据反演的海面水表皮的亮温和辐亮度. 海水亮温除个别点可能是浪花影响外, 整体变化幅度很小, 在 0.5°C 内. 利用 CE-312 测量亮温数据 (取 10:00h 到 10:10h 的平均值)、北海 8:00h (北京时间) 探空数据输入 MODTRAN 软件包, 计算获得分谱辐射亮度、程辐射、大气透过率等数据, 然后与卫星红外通道光谱响应卷积, 获得卫星红外通道入瞳处辐亮度. 当天大气较为稳定, 利用 8:00h 的探空数据误差较小.

表 2 为当天 FY-2C 在 10 点红外云图中的北部湾对应海区的计数值、空间计数值、卫星入瞳处辐亮度与定标系数和截距.

4 结语

2 次南海辐射定标的试验结果说明, 利用南海

表 1 2005 年 10 月 22 日北部湾海域海水亮温与辐亮度数据

Table 1 The brightness temperature and radiance data at Beibu Bay in Oct. 22, 2005

d	m	y	h	min	s	11.5 ~ 12.5 μm		10.3 ~ 11.3 μm	
						$^{\circ}\text{C}$	$\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$
22	10	2005	9	9	47	27.34	125.29	27.44	109.60
22	10	2005	9	10	53	27.54	125.63	27.56	109.80
22	10	2005	9	11	45	27.27	125.18	27.53	109.74
22	10	2005	9	27	14	26.39	123.68	27.20	109.21
22	10	2005	9	39	31	27.26	125.15	27.30	109.38
22	10	2005	9	53	46	27.25	125.13	27.19	109.20
22	10	2005	10	5	38	27.00	124.72	27.19	109.19
22	10	2005	10	6	30	27.18	125.01	27.43	109.58
22	10	2005	10	7	0	26.64	124.11	27.40	109.54
22	10	2005	10	9	35	27.50	125.56	27.51	109.72
22	10	2005	10	10	27	27.56	125.67	27.39	109.52
22	10	2005	10	11	18	27.20	125.05	27.48	109.68
22	10	2005	10	18	38	27.21	125.07	27.21	109.23
22	10	2005	10	19	31	27.14	124.96	27.22	109.25
22	10	2005	10	20	33	27.30	125.23	27.23	109.26

表 2 2005 年 10 月 22 日 10h (北京时间) FY-2C IR1、IR2 对应海区数据

Table 2 The digital count of FY-2C infrared channel 1 and 2 at 10th in Oct. 22, 2005

时间 10:00	计数值	空间计 数值	入瞳处 辐亮度	定标系数	定标截距
IR1	395	996	1.039439×10^{-5}	-0.172956	172.2598
IR2	427	992	1.157379×10^{-5}	-0.204846	203.2071

海水也能进行风云二号卫星红外通道的在轨定标。尽管南海大气的水汽含量较大,但由于下垫面对于静止气象卫星的卫星天顶角较小,大气对辐射传输的影响较小。如果正式按照《中国遥感卫星辐射校正场同步测量规范》进行试验,在测量时间同步放探空气球获得同时间的大气各层温、湿、压等数据,进行大气光学厚度测量等,就可以获得较为全面的同步测量数据。经过辐射传输计算与定标处理后即可得到准确的外场辐射定标结果。

REFERENCES

- [1] QIU Kang-Mu. The construct, scientific & technology production and its application foreground of China Radiometric Calibration Site for remote sensing satellite[C]. The scientific & technology production papers florilegium of China Radiometric Calibration Site for remote sensing satellite. Beijing: Ocean Press (邱康睦. 中国遥感卫星辐射校正场建设和科研成果及其应用前景. “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, 3.
- [2] RONG Zhi-Guo ZHANG Yu-Xiang, QIU Kang-Mu. The radiometric calibration on orbit for FY-2B meteorological satellite's visible channels with the radiometric calibration site of dunhuang[J]. *Journal of applied meteorological science* (戎志国, 张玉香, 邱康睦. 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. *应用气象学报*), 2004, 15(3): 266—272.
- [3] HU Xiu-Qing, RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using Qinghai Lake[J]. *Space Science Transaction* (胡秀清, 戎志国, 邱康睦. 利用青海湖水表面辐射校正场对 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—P380.
- [4] RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu, HU Xiu-Qing, et al. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2B meteorological satellite's IR channel[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 邱康睦, 胡秀清, 等. 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. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(6): 408—P412.
- [5] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, LU Feng, et al. Inter-calibration of FY-2B IR channel with NOAA satellites. *Acta Meteorologica* (戎志国, 张玉香, 陆风, 等. FY-2B 与 NOAA 卫星红外通道的相对定标. *气象学报*), 2005, 63(4): 485—492.
- [6] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. The calibration method for water vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 王玉花, 等. 风云二号 B 星星载扫描辐射计水汽通道定标方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 357—360.
- [7] GUO Qiang, XU Jian-Min, ZHANG Wen-Jian. Full-field-of-view stray light estimation for FY-2 meteorological satellite based on the high-order statistical eigenvalues[J]. *Optical Technique* (郭强, 许健民, 张文建. 基于高阶统计特征的 FY-2 气象卫星全视场杂散光估计. *光学技术*), 2004, 30(6): 748—752.