第21卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.4
2001 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2001

利用青海湖对 FY-1C 、FY-2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标*

胡秀清 戎志国 邱康睦 张玉香 张广顺 黄意玢
(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要

介绍利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 、FY2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标. 先用 CE312 野外热红外辐射计在水面测量水表辐亮度, 再经大气订正传递到卫星入瞳处, 大气订正包括大气吸收削弱和大气产生热发射影响, 这两部分对卫星信号的贡献通过辐射传输模式 MODTRAN37 计算出来. 同时进行 CE312 与卫星通道光谱响应匹配, 最终得到卫星入瞳处的表观辐亮度. 这个辐亮度与卫星通道的计数值得到该通道绝对定标系数. 我们对两颗卫星进行了多次定标, 结果表明利用青海湖进行的在轨定标与星上定标系数相差 5% 左右, 相当于 3 K 的亮温差.

关键词 在轨定标—光谱响应匹配—辐射传输计算—入瞳处辐亮度

1 引言

FY-1C 极轨气象卫星和 FY-2B 静止气象卫星分别于 1999 年 5 月 10 日和 2000 年 6 月 25 日成功发射. 其可见近红外和热红外传感器在发射前都进行了完整实验室定标, 其中热红外通道传感器 (FY-1C: 10.3—11.3 μm 、 11.5—12.5 μm; FY-2B: 10.5—12.5 μm) 利用实验室黑体和星内黑体进行发射前定标, 定标实验在模拟太空环境的真空罐里进行, 卫星传感器对着不同温度 (180—340 K) 黑体进行测量, 并测量模拟冷空间低温黑体 (90 K), 由输出电压值或计数值与黑体辐亮度对应关系得出定标系数 (斜率和截距). 当卫星发射入轨后, 由于发射的影响和空间工作的环境温度变化, 发射前的定标关系可能发生变化, 需要采用星上暖黑体和冷空间作为定标源, 进行星上定标, 这一过程每次观测重复进行, 既可以检测卫星内部变化, 也为热红外通道提供实时定标数据. 定标系数直接用于红外通道计数值向辐亮度和等效亮温转换. FY-2B 星上黑体源是从后光路插入的, 观测黑体和观测地球目标的光路不完全相同, 因此 FY-2B 星上红外定标结果不能直接用于计数值向辐亮度和等效亮温转换, 需要将全光路和黑体后置光路进行归一拟合. 同时随着星上传感器和定标设备的老化, 星上定标的准确性和可靠性需要检验和修正, 于是提出了另一种独立的定标方法, 利用地面目标进行绝对辐射定标.

利用地面目标对卫星传感器进行在轨绝对辐射定标, 也称替代定标 (Vicarious calibration), 对于可见近红外到短波红外通道在国外已经十分普遍, 在国内经过对 FY-1C 、

* 重点卫星应用项目中国遥感卫星辐射校正场资助 (Y96#08-01-04)
2001-03-17 收到原稿, 2001-08-25 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

FY-2B 及 CBERS-1 卫星传感器进行定标试验也已趋于成熟. Biggar[1] 在他的博士论文中系统阐述了这一方法. 但这一方法在热红外通道的应用首次由 Palmer[2] 对 TM 传感器 6 通道进行试验，结果与发射前定标相差 5%，相当于 3.4 K 的亮温差，Palmer 主要采用 Everest 130 AL 红外辐射计以白沙场作为目标进行的. Slater[3,4] 在 EOS 的定标计划时提到热红外通道在轨定标的三种可行方法. 第一种方法是在卫星过境时利用定标好的辐射计测量定标场向上的辐亮度，并在目标冷热时分别进行，同时进行气象探空测量获取大气温湿压廓线，由测量的定标场辐亮度和辐射传输计算出的大气影响，推算出卫星通道入瞳处的表观辐亮度. 第二种方法就是在 7 km 高飞机平台上利用红外辐射计测量定标场辐亮度，然后经过较小的大气订正得到入瞳处的表观辐亮度. 第三种方法测量定标场的辐亮度、大气向下的辐亮度、近地面的相对湿度和地表发射率. Palmer 使用的是第三种方法. 为了提高定标精度，Slater 还特别建议选择海拔较高面积较大温度均一的水面场，如美国 Nevada 的 Tahoe 湖.

青海湖位于青藏高原东北部，海拔为 3 196 m，湖面广阔，一般无大风大浪，夏季湖面温度均一，是一个天然均一红外目标. 1994 和 1999 年两次对青海湖综合考察表明，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定标条件. 青海湖水面温度水平梯度平均为 0.03°C/km，说明水温分布十分均匀. 青海湖地区属于较高寒半干燥草原气候，海拔较高，大气干洁，卫星信号大气订正较小. 由于这些有利条件，青海湖被选为中国遥感卫星辐射校正场热红外定标场 [5]. 这里我们利用青海湖这个近似均匀黑体作为定标目标，对 FY-1C、FY-2B 卫星热红外通道进行在轨辐射定标.

我们采用 Slater 提出第一种方法，当 FY-1C 卫星在青海湖上空过境以及 FY-2B 对青海湖进行扫描测量时，利用模拟卫星通道热红外辐射计 CE312 在湖面测得湖水向上辐亮度，再经过大气订正，计算出卫星入瞳处辐亮度. 我们把这一目标的辐亮度和卫星计数值作为高点，再利用卫星扫描冷空间作为一低点，由这两点画定标曲线，推出斜率和截距. 我们于 1999 年 7 月 FY-1C 卫星在轨测试期间对其进行了第一次在轨定标，2000 年 8 月对 FY-1C、FY-2B 两颗卫星同时进行了定标，多次定标结果表明这一定标方法结果可信，在轨定标与星上定标结果相差 5% 左右，相当于 3 K 的亮温差. 这一定标方法不仅可以对星上黑体定标结果进行验证，而且在星上定标出现偏差或异常时，在轨定标是一个很好的补充.

2　定标原理

2.1　定标公式

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}) 辐亮度可表示为

$$R_{\mathrm{s}}(\nu)=R_{\mathrm{w}}(\nu)\tau_{\mathrm{a}}(\nu)+\int_0^{\infty}B[T(z)]\frac{\partial\tau_{\mathrm{a}}}{\partial z}\mathrm{d}z, \tag{1}$$

其中，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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

积分，就得到卫星某一通道 i 的辐亮度：

$$R_{si} = R_{wi} \cdot \tau_{ai} + R_{ai}. \tag{2}$$

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.

卫星通道辐亮度与卫星计数值关系为

$$R_{si} = G_i \cdot DC_i + I_i. \tag{3}$$

DC_i 为卫星通道计数值， 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个计数值，冷空间的辐亮度为 0，青海湖目标的辐亮度正是下面要得到的量.

2.2 定标流程

FY-1C 、 FY-2B 卫星热红外通道定标流程如图 1 所示. 定标过程包括野外测量、卫星计数值提取、星地光谱响应匹配、辐射传输计算和定标系数推导等几个部分.

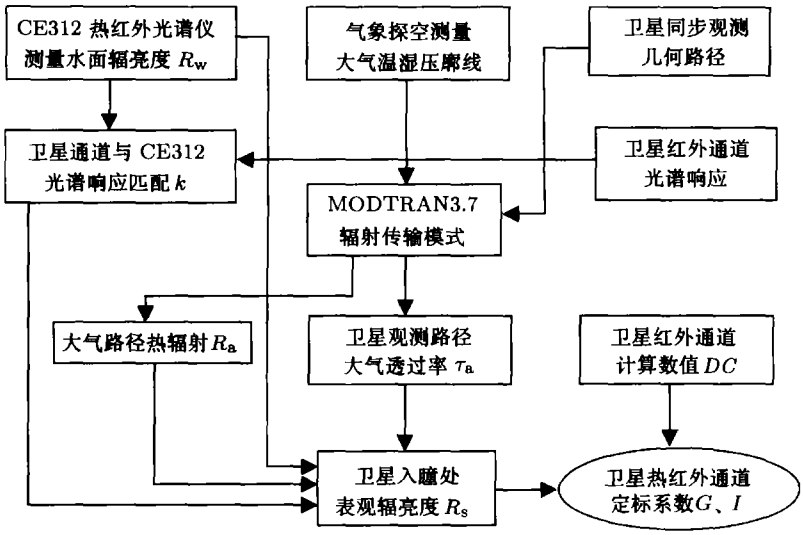


图 1 FY-1C 、 FY-2B 气象卫星热红外通道在轨定标流程

Fig.1 Flow chart of in-flight calibration for TIR sensors of FY-1C and FY-2B meteorological satellite

2.3 星地光谱匹配

尽管水表辐亮度测量仪器 CE312 的通道是模拟卫星光谱通道，但其光谱响应不可能完全一致，因而 CE312 测得水表辐亮度与卫星通道观测的水表辐亮度就会存在差异，为了消除这一差异，需要进行 CE312 和 FY-1C 对应通道的光谱匹配处理. 卫星模拟辐射计 CE312 测量的同时，我们还利用 BOMEN MR-154 热红外光谱仪测量水面的热红外光谱，将该水体红外光谱作为基准， CE312 和 FY-1C 对应通道的光谱响应分别与该水体红外光谱进行通道归一化，得到各自通道的归一化辐亮度，这两个仪器通道的归一化辐亮度的比值就作为它们的光谱匹配因子，这一因子用于对 CE312 测得水表辐亮度进行修正.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

图 2 显示 FY-1C 星 4 、 5 通道与 CE312 通道光谱响应对应情况. 图 3 显示 FY-2B 星 4 、 5 通道与 CE312 对应通道光谱响应. 将 CE312 通道光谱响应与 MR-154 红外光谱仪测量青海湖水面红外光谱归一，得到 CE312 通道辐亮度：

$$R_{\mathrm{CE}}=\frac{\int L_{\mathrm{M}}(\lambda)F_{\mathrm{DE}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int f_{\mathrm{CE}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}. \tag{4}$$

其中， L_{M} 为 MR-154 测量水面光谱辐亮度， $f_{\mathrm{CE}}(\lambda)$ 为 CE312 通道光谱响应函数， FY-1C 、 FY-2B 卫星通道光谱响应与 MR-154 测量青海湖水面红外光谱归一化，得到卫星通道上的辐亮度：

$$R_{\mathrm{s}}=\frac{\int L_{\mathrm{M}}(\lambda)\cdot f_{\mathrm{s}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int f_{\mathrm{s}}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}. \tag{5}$$

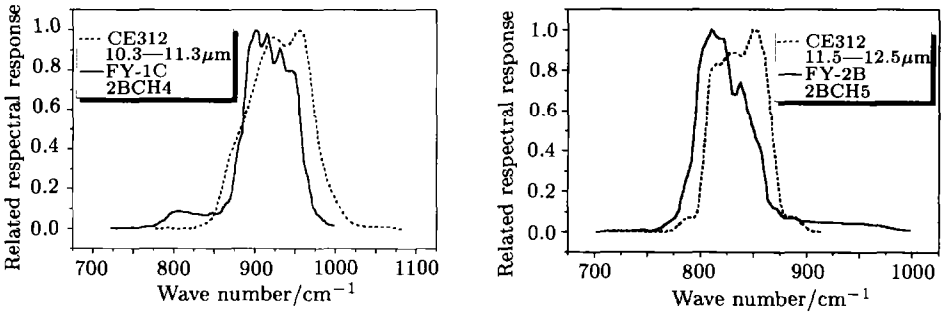


图 2　FY-1C 卫星 4 、 5 通道与 CE312 通道光谱响应对应曲线
横坐标：波数 (cm^{-1})，纵坐标：相对光谱响应，
图例：虚线为 CE312 通道，实线为 FY-1C 通道 4((a) 图) 通道 5((b) 图)
Fig.2　Spectral Response of 4 and 5 channels of FY-1C and CE312's band

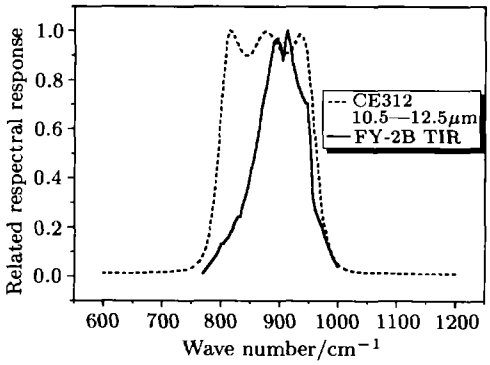


图 3　FY-2B 卫星热红外通道与 CE312 通道光谱响应对应曲线
Fig.3　Spectral Response of TIR channel of FY-2B and CE312's band

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$f_s(\lambda)$ 为 FY-1C 或 FY-2B 通道光谱响应函数，星地光谱匹配因子：

$$k = \frac{R_s}{R_{CE}}. \tag{6}$$

FY-1C 卫星 4 、 5 通道星地光谱匹配因子分别为 1.03 和 1.01, FY-2B 热红外通道星地光谱匹配因子为 0.9278 考虑星地光谱响应匹配，卫星入瞳处的辐亮度计算公式 (2) 就变为

$$R_{si} = k_i \cdot R_{wi} \cdot \tau_{ai} + R_{ai}. \tag{7}$$

3 地基观测和辐射传输计算

3.1 水表和大气测量

热红外通道在轨定标，首先要精确测量定标目标青海湖水体向上辐亮度. 在卫星过境前后一个小时利用 CE312 野外热红外辐射计 [6] 测量青海湖水面向上辐亮度，同时进行探空和地面气象要素观测. 我们携带仪器乘船到达离岸边约 10 km 的湖面，测量仪器包括野外热红外辐射计 CE312 、 BOMENMR-154 热红外光谱仪和 M340 黑体源，黑体源用来对两台热红外仪器进行现场定标. CE312 和 MR-154 同时对水面目标进行水表辐亮度测量. 在测量水面目标前，将黑体温度调至水面目标温度 ±6 K 内几个温度，两台仪器分别对黑体源进行测量，从而为两台仪器现场定标. 定标测量完成后，将辐射计头部用悬杆伸出到船体外测量未被航船破坏的水面，测量在船头进行，所有测量都重复进行多次. 测量分走航和停船定点测量， 1999 和 2000 年两次测量都在青海湖的东南部水域进行， 2000 年测量船航行路线和停航点如图 4 所示. 整个同步观测过程在卫星过境前后 1 h 内完成，由水表温度计测量水体表层温度显示：水表温度在同步观测前后 1 h 变化在 0.2 K 以内，

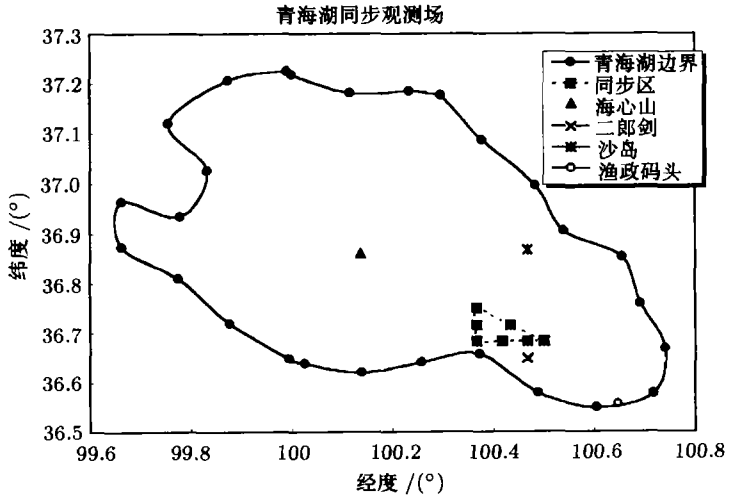


图 4 2000 年青海湖水表辐亮度测量航船路线示意图
Fig.4 Measurement route in Qinghai Lake August 2000

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

所以将卫星过境前后 30 min 测量结果平均作为卫星过境时刻水表辐亮度. 表 1 列出 1999 年 7 月和 2000 年 8 月 CE312 辐射计在青海湖卫星过境前后测得水表辐亮度.

星地同步观测时，在青海湖岸边鱼政码头释放探空气球，测量大气温湿压风廓线，除了每天 7:00 和 19:00 两次常规气象探空外，在卫星过境时刻加密一次探空. 同时岸边和航船上进行半小时间隔地面常规气象要素观测，并且用表层水温度计测量表层水体温度. 这些测量结果既可用于辐射传输模式输入参数，又可以将辐射计测量亮温与表层水温进行比较.

表 1　1999 年 7月和 2000年 8月卫星过境前后 CE312 各通道在青海湖测量水表辐亮度平均值

日　期	时间 (北京时)	CE312 测量辐亮度 ($mW/m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$)		
		10.3—11.3 μm	11.5—12.5 μm	10.5—12.5 μm
1999-7-28	10:33	93.9831	109.271	
1999-7-29	10:23	95.3264	110.754	
1999-7-30	10:13	95.5135	110.665	
1999-7-31	21:29	96.8497	112.125	
2000-8-24	10:00	93.8729	108.8188	102.2721
2000-8-26	9:32	94.1652	109.2763	102.4378
2000-8-26	20:55	94.3492	109.4205	102.5011
2000-8-28	10:30	93.8439	108.7361	102.1222
2000-8-30	10:30	93.4718	108.1598	101.5110

3.2　大气透过率和大气程辐射计算

利用辐射传输模式，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地面目标信号，这里我们选用 MODTRAN3.7[7] 进行大气透过率和大气程辐射计算.

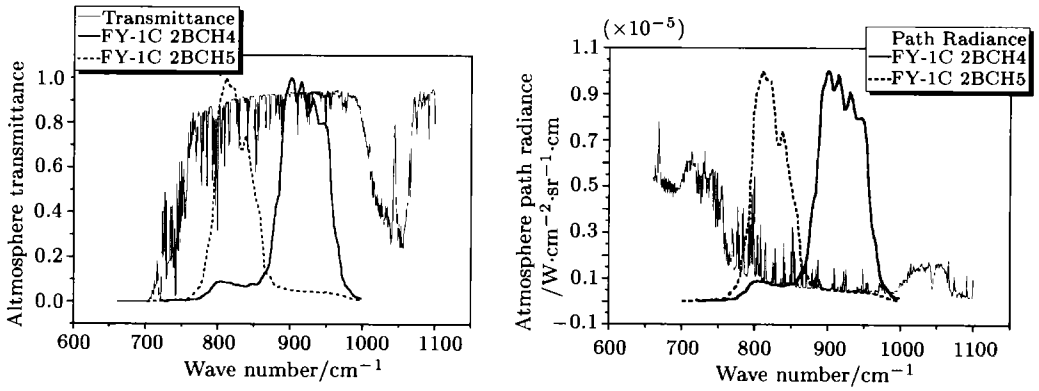


图 5　用 MODRAN3.7 计算出 2000 年 8 月 24 日 FY-1C 观测路径大气透过率和大气程辐射

Fig.5　Atmospheric Transmittance and path radiance of FY-1C viewing path calculated by MODRAN3.7 August 24, 2000

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

MODTRAN 是一个中分辨率大气辐射传输模式，它是 LOWTRAN7 的改进版，光谱分辨率由 $20\,cm^{-1}$ 提高到 $2\,cm^{-1}$. 覆盖的光谱范围是 0—$22\,600\,cm^{-1}$($0.44\,\mu m$—∞)，吸收带模式参数用最新 HITRAN96 计算而来. MODTRAN 和 LOWTRAN7 的主要区别在于计算分子透过率方法，LOWTRAN 采用单参数带模式，MODTRAN 采用的带模式使用 3 个与温度相关参数：吸收系数、线密度参数和平均线宽. MODTRAN 的关键输入参数有：边界层温度、探空廓线、地面能见度、地面海拔、几何路径、计算波长位置等.

我们将卫星过境时的大气探空廓线和卫星观测几何参数输入 MODRAN3.7 模式，然后将 MODRAN3.7 输出的分谱大气透过率和大气程辐射与 FY-1C 通道光谱响应进行卷积，得到 FY-1C 热红外 4、5 通道的大气透过率和大气程辐射. 图 5 显示了 MODRAN3.7 计算出 2000 年 8 月 24 日 FY-1C 观测路径大气透过率和大气程辐射，图中明显看出大气在热红外窗区气体吸收和热发射随波长的变化情况. 我们从计算结果中发现，大气透过率与大气程辐射有着明显的反比关系：卫星天顶角越大，大气路径越长，透过率越小，大气程辐射越大. 大气中的水汽量是热红外窗区主要大气影响因子，它对热红外辐射既有较强的吸收，同时产生热发射，从探空廓线相对湿度积分得出大气柱水汽总量得知：8 月 24 日和 26 日大气透过率和大气程辐射的不同主要是由于大气中的水汽量不同造成的.

3.3 入瞳处辐亮度与亮温

计算出大气透过率和大气程辐射后，已知水表辐亮度和光谱匹配因子，可利用公式 (7) 计算出卫星入瞳处的辐亮度，由辐亮度和通道中心波数依据普朗克函数得到通道亮温. 表 2 列出了 FY-1C、FY-2B 红外卫星通道 1999、2000 年星地同步观测时刻入瞳处的辐亮度及亮温. 从入瞳处的辐亮度及亮温看，1999 年和 2000 年两次在不同天星地同步观测时刻变化很小，这不仅证实青海湖是一个很好的热红外定标目标，而且表明了这两次在轨辐射定标自身的一致性.

表 2 1999 和 2000 年 FY-1C、FY-2B 卫星星地同步观测时刻入瞳处的辐亮度及亮温

日 期	FY-1C CH4		FY-1C CH5		FY-2B TIR		实测温度
	辐亮度	亮温	辐亮度	亮温	辐亮度	亮温	
	$mW/m^2\cdot sr\cdot cm^{-1}$	K	$mW/m^2\cdot sr\cdot cm^{-1}$	K	$mW/m^2\cdot sr\cdot cm^{-1}$	K	°C
1999-7-28	94.7714	287.122	106.585	286.0201			16.2
1999-7-29	96.8466	288.4762	108.921	287.4919			16.8
1999-7-30	96.5229	288.2661	108.084	286.9663			16.9
1999-7-31 晚	97.0413	288.6025	108.247	287.0691			17.9
2000-8-24	94.3790	287.0470	105.6147	285.6260	96.3248	286.8461	15.9
2000-8-26	95.0681	287.5007	106.7828	286.3696	97.4076	287.5529	15.8
2000-8-26 晚	95.4041	287.7217	107.0856	286.5611			15.9
2000-8-28					97.4073	287.5527	15.4
2000-8-30					97.4151	287.5578	15.5

4 定标系数确定和误差分析

4.1 卫星计数值获取

经过大气订正，将水表测得辐亮度传递到卫星入瞳处，得到卫星入瞳处通道表观辐亮

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

度后，只有得到卫星计数值才能推出定标系数. 卫星计数值提取时，要确保提取区域为地基水表同步观测区. 经过精确定位，我们选择同步观测中心区 (36.783°E,100.399°N)，向四周扩展 10 个像素点，也就是 20×20 个像素点区域计数值取平均为卫星通道计数值. 同时我们提取卫星通道扫描冷空间计数值. 对 2000 年青海湖 3 天同步测量 (8 月 24 、 26 白天， 8 月 26 日晚)，我们在提取卫星计数值时，发现 8 月 26 日晚间 FY-1C 星同步区域计数值非常不均匀，再看原始热红外图像发现同步观测区域有少量薄云存在，同步观测区计数值明显偏大，所以 8 月 26 日晚间数据不能用做热红外通道定标. 其他几次同步观测期间青海湖上空均无云，可以用来定标计算. 图 5 显示 8 月 24 日青海湖地区 FY-1C 图像，从图像中可见青海湖东南部大部分区域无云，而且湖面均匀性很好.

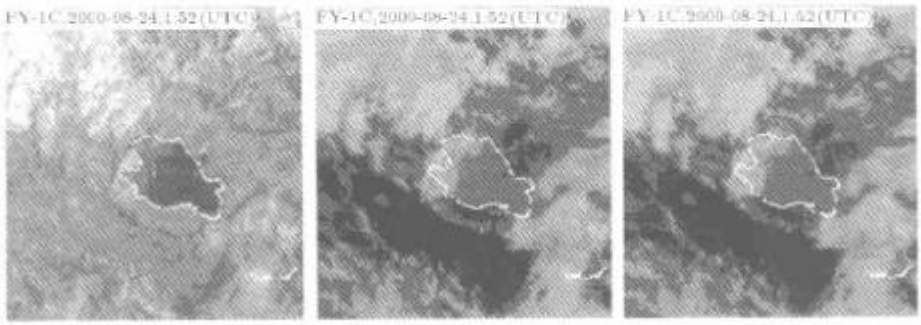


图 6　2000 年 8 月 24 日 0952 时 (北京时)FY-1C 观测青海湖地区图像
从左至右依次为：可见光合成， 4 通道， 5 通道
Fig.6　Qinghai Lake location image of FY-1C 9:52 August 24, 2000
(Left to right: Visible RGB, 4 channel, 5 channel)

4.2　定标斜率和截距

由青海湖和冷空间两个目标的辐亮度和计数值，利用公式 (3) 就可以推出卫星通道定标系数，表 3 列出 FY-1C 卫星 2000 年 8 月两次有效定标结果. 从结果看出这两天定标的斜率和截距非常接近. 尽管 8 月 24 日和 8 月 26 日两天大气中的水汽量不同，而且这两次卫星过境时观测天顶角也有差异 (24 日为 1.11°, 26 日为 3.59°)，即大气路径不同，反映在卫星计数值上也有差别，但通过我们的大气订正基本克服了大气对卫星信号的影响，最终这两天的定标系数十分接近.

表 3　1999 和 2000 年 FY-1C 、 FY-2B 卫星利用青海湖目标的在轨定标得到的定标斜率和截距

日　期	FY-1C CH4		FY-1C CH5		FY-2B TIR	
	斜率	截距	斜率	截距	斜率	截距
1999-7-29	0.14993	150.5312	−0.158916	158.9159		
1999-7-30	−0.15232	152.9257	−0.158690	158.6903		
2000-8-24	−0.1862	187.6411	0.2096	310.8102	−0.5768	147.0828
2000-8-26	−0.1860	187.5317	0.2077	208.9951	−0.5868	149.6321
2000-8-28					−0.5833	148.7357
2000-8-30					−0.5764	146.9872

注：斜率 (mW/m^2-sr-cm^{-1})/ 单位计数值，截距 mW/m^2-sr-cm^{-1}.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

4.3 误差分析

从我们的定标流程看，最终定标系数包含多项误差来源，主要包括：水表辐亮度测量误差、光谱匹配误差、大气辐射传输计算精度、卫星计数值获取和冷空间处理. 对各项误差的具体分析如下.

(1) 水表辐亮度测量误差直接带入到卫星入瞳处辐亮度，它的测量精度直接影响最终精度. CE312 的测量精度误差小于 0.3 K[6].

(2) 地面模拟辐射计和卫星传感器光谱响应差异不能忽略，尤其 FY-2B 星热红外通道的光谱响应与地面仪器 CE312 对应通道相差较大，匹配因子为 0.9278, 考虑和不考虑星地光谱匹配因子最终会带来 1.5 K 的亮温差. 另外我们在星地光谱匹配时所用的卫星光谱响应是卫星发射前实验室定标得到的，卫星入轨后它的光谱响应是否发生变化，我们无法进行修正.

(3) 大气辐射传输计算精度会影响大气透过率和大气程辐射，大气对卫星信号影响因子主要是水汽， MODTRAN 辐射传输模式计算基本满足精度要求.

(4) 我们这里采取定标公式 (3) 是假设卫星热红外通道观测的辐亮度与计数值为线性关系, 用冷空间和水面两点画定标曲线, 其实热红外通道的非线性问题在 NOAA/AVHRR* 和 GOES[8] 卫星定标都有所考虑. 我们从 FY-2B 红外通道发射前定标和星上定标都发现高端偏差较小，而低端偏差较大，如果在定标公式中加上 DC 二次项就会减少因非线性假设带来的误差. 如果考虑非线性问题，就需要第三个定标目标.

表 4 1999 和 2000 年 FY-1C 热红外通道星上定标与在轨定标结果比较

日 期	FY-1C CH4			FY-1C CH5			实测温度
	斜 率	截 距	湖面亮温	斜 率	截 距	湖面亮温	°C
1999-7-29*	−0.14503	145.69119	286.66	−0.14954	151.2185	284.66	16.8
1999-7-30*	−0.14551	146.08112	286.16	−0.15005	152.0204	284.66	16.9
1999-7-29+	−0.14993	150.5312	288.4762	−0.15892	158.9159	287.4919	16.8
1999-7-30+	−0.15232	152.9257	288.2661	−0.15869	158.6903	286.9663	16.9
2000-8-24*	−0.1773	178.7641	284.060	−0.1911	194.3422	281.0740	15.9
2000-8-26*	−0.1781	179.6024	284.978	−0.1931	196.3249	282.9724	15.8
2000-8-24+	−0.1862	187.6411	287.047	−0.2096	210.8102	285.6260	15.9
2000-8-26+	−0.1860	187.5317	287.500	−0.2077	208.9951	286.3696	15.8

注: * 表示星上定标, + 表示在轨定标.

表 4 列出了 FY-1C 热红外通道星上定标与在轨定标比较，表中还列出了利用星上定标和在轨定标系数推算出卫星观测到青海湖水面亮温，为了比较分析，表中也列出了水面温度的实测值. 从表中可以看出 FY-1C 热红外通道星上定标结果 2000 年与 1999 年相差较大，而且地面遥测到星上黑体温度从 1999 年 7 月的 280 K 增加到 2000 年 9 月近 290 K, 说明星上的热环境发生了较大变化，星上定标可能会存在偏差. 利用青海湖进行的在轨定标结果与星上定标结果相比，斜率低 5% 左右，截距高 5% 左右，湖面亮温高 3 K 左

*NOAA KLM User's Guide: Section 7: Calibration of NOAA KLM Instruments. From homepage: http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/ , 2000

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

右. 1999 年 FY-1C 星在轨测试报告中指出：FY-1C 探测到渤海亮温比同期 NOAA-15 低 1.5 K 左右，表 4 中同在轨定标结果相比，利用星上定标得到青海湖的亮温也偏低. 2000 年 8 月 24 、 26 日 FY-1C 过境时刻温度计测量的水表温度平均值都为 289 K 左右，如果假设星上定标准确， FY-1C 卫星 4 通道观测的亮温与水表温度相差 4—5 K, 5 通道得到的亮温比水表温度低 6—8 K, 即大气的影响会达到 4—8 K, 这对于无云大气来说大气影响偏高. 以上事实说明 FY-1C 星上黑体定标结果可能偏低，我们利用青海湖进行的在轨定标具有更可信的结果.

5　结语

本文利用青海湖水面辐射校正场对 FY-1C 、 FY-2B 气象卫星热红外通道传感器在轨定标进行了初步探索和试验，结果表明在轨定标与星上定标相差 5% 左右，相当于 3 K 的亮温差. 比较分析认为利用地面目标进行在轨定标方法可行，定标结果可信，并初步判断 FY-1C 星上黑体定标可能偏低. 试验证明在轨定标法既可以对星上定标结果进行检验和验证，也可以在星上定标出现异常时作为有效补充. 如何将辐射校正场在轨定标与发射前定标以及星上定标结合起来，分析各自优缺点和精度误差是值得深入研究的课题.

致谢　本项研究和试验是在辐射校正场办公室的组织和领导下完成的，并得到诸多兄弟单位大力协作和帮助，青海省气象局进行探空观测和后勤保障，中国科学院安徽光机所、国家海洋局天津海洋技术物理研究所等单位同志为试验数据获取提供了极大帮助. 本次试验还得到国家科技部等上级领导的关心和支持，并到现场视察和指导工作. 卫星研制部门上海技术物理研究所一同参加了本次试验工作. 在此一并表示感谢.

参　考　文　献

[1] Biggar S F. In-flight methods for satellite sensor absolute radiometric calibration. Dissertation of PhD. 1990, The University of Arizona, Tucson, US

[2] Palmer J M. Calibration of satellite sensors in the thermal infrared. *Proc. SPIE*, 1993, **1762**:108—117

[3] Slater P N *et al.* Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1996, **13**(2):349—359

[4] Slater P N *et al.* Radiometric calibration of ASTER data. *Jap. J. Remote Sensing*, 1995, **15**:16—23

[5] Hu Xiuqing *et al.* Optical characteristics of China radiometric calibration site for remote sensing satellite sensors (CRCSRSSS). SPIE Proc., 2000, **4151**:77—86

[6] Sicard M *et al.* Thermal-infared field radiometer for vicarious cross-calibration: characterization and comparisons with other field instruments. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(2):345—356

[7] Kneisys F X *et al.* The Modtran 2/3 and Lowtran 7 Model. Maryland: MODTRAN Report, 1995

[8] Sicard M W *et al.* Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 imagers and sounders. *Appl. Opt.*, 1997, **36**:6 895—6 904

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

IN-FLIGHT RADIOMETRIC CALIBRATION FOR THERMAL CHANNELS OF FY-1C AND FY-2B METEOROLOGICAL SATELLITE SENSORS USING QINGHAI LAKE

HU Xiuqing RONG Zhiguo QIU Kangmu ZHANG Yuxiang
ZHANG Guangshun HUANG Yibing
(*National Satellite Meteorological Center, Beijing* 100080)

Abstract

This Paper describe the in-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1C and FY-2B meteorological satellite sensors using Qinghai lake, water surface radiometric calibration site. The radiance of water surface measured by CE312, and then performed atmosphere correct including gas absorption and path radiance which computed by radiance transfer code MODTRAN37, predict the radiance in the satellite sensor entrance pupil. At the same time the spectral response of Satellite sensor and that of ground-based sensor are coupled. At last the apparent radiance of sensor spectral channels are compared to the digital count of satellite's output to give the calibration coefficient. Several calibration is conducted for the satellite thermal sensors of FY serial satellites. The result show the difference between in-flight and on-board calibration is about 5%, equivalent to a brightness temperature of 3 K.

Key words In-flight calibration, Spectral response match, Radiance transfer calculation, Apparent radiance

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com