

风云一号扫描辐射计可见近红外 通道辐射定标试验

张智敏 郑亲波

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——本文提出了一种扫描辐射计可见、近红外通道的辐射定标方法。阐述了定标原理, 试验过程及试验结果; 并对误差进行了分析。结果表明, 以太阳为标准光源, 在大气相对宁静的条件下, 对扫描辐射计进行定标, 可以获得较好的目标光谱特征的反演精度。

关键词——辐射定标, 辐射计, 大气透过率。

1. 引 言

为了从扫描辐射计的输出信号中获取地球目标特征, 在卫星发射前须对扫描辐射计的各个通道进行辐射定标。该辐射定标主要是确定各通道的探测灵敏度及目标探测动态范围, 以保证目标的有用信号不被饱和或输出太小, 使地面接收站得到反差适中的清晰图象。通过可见、近红外定标还可确定仪器输出信号与地球目标的辐射亮度或反照率的关系曲线, 以便卫星运行时由扫描辐射计的输出获取地球目标的光谱亮度或反照率信息。本文主要介绍对扫描辐射计的可见、近红外通道的地面辐射定标方法。

以往对太阳光谱辐照的大量测试结果表明^[1], 在宁静的大气状态下, 以太阳为标准光源, 可以对扫描辐射计的可见、近红外通道进行辐射的绝对定标。

2. 基本 原 理

以太阳为标准光源, 在地面对扫描辐射计可见、近红外通道的定标, 是将扫描辐射计对准在太阳辐照下已知辐照亮度或反照率的充满扫描辐射计视场的目标, 获取目标不同辐亮度或反照率与对应的扫描辐射计输出的关系曲线。因此, 定标的关键是确定目标在太阳与天空辐照下的辐亮度。这是一种绝对定标。本文所采用的方法是通过相对测量以达到绝对

定标的要求。

在外层空间, 阳光直射下的理想漫反射体的光谱亮度

$$B_{0\lambda} = \frac{E_{0\lambda}}{\pi},$$

式中 $E_{0\lambda}$ 为地球大气层外太阳的光谱辐照度。地面上, 正对太阳的目标的光谱亮度

$$B_{e\lambda} = \frac{E_{e\lambda}}{\pi} \rho_{\lambda} = \frac{E_{0\lambda} \tau_{\lambda}^m}{\pi} \rho_{\lambda},$$

其中, ρ_{λ} 为目标的光谱反射率; m 为大气的光学质量; τ_{λ} 为大气垂直向上的光谱透过率, 即 $m=1$ 的光谱透过率; $E_{e\lambda}$ 为地面的太阳光谱辐照度。

在地面上, 用于定标的标准反射率板上的实际辐照除太阳直射外, 还有天空散射的光谱辐照 E_{sky} 。因此反射率板上的光谱辐亮度为

$$B_{B\lambda} = \frac{1}{\pi} (E_{0\lambda} \tau_{\lambda}^m + E_{sky}) \cdot \rho_{\lambda}. \quad (1)$$

为获得 E_{sky} 值, 我们制作了一台多通道光谱仪见本期彩色插页图 e 所示, 其光谱带通特性及探测器光谱响应与扫描辐射计相一致, 可测量太阳的直接光谱辐照与包括天空散射在内的总辐照。仪器在这两种辐射状态下的输出比为

$$\frac{V_{sun}}{V_{total}} = \int \frac{R_{\lambda} E_{0\lambda} \tau_{\lambda}^m d\lambda}{R_{\lambda} (E_{0\lambda} \tau_{\lambda}^m + E_{sky}) d\lambda}; \quad (2)$$

式(2)中, R_{λ} 为仪器的光谱响应; V_{sun} 为直接测量太阳辐射的多通道光谱仪各波段输出; V_{total} 为测得的包括天空散射辐射在内的各波段输出。积分限为各波段光谱通带。由定积分中值定理

$$\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} x(\lambda) y(\lambda) d\lambda = x(\lambda_c) \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} y(\lambda) d\lambda \quad (\lambda_a < \lambda_c < \lambda_b),$$

可以得到

$$\frac{V_{sun}}{V_{total}} = \frac{\tau_{\lambda_c}^m \int E_{0\lambda} d\lambda}{\tau_{\lambda_c}^m \int E_{0\lambda} d\lambda + \int E_{sky} d\lambda}, \quad (3)$$

$$\int E_{sky} d\lambda = \frac{V_{total} - V_{sun}}{V_{total}} \tau_{\lambda_c}^m \int E_{0\lambda} d\lambda; \quad (4)$$

目标的反照率 A 为

$$A = \frac{\int B_{B\lambda} d\lambda}{\int B_{0\lambda} d\lambda} = \frac{\int \rho_{\lambda} (E_{0\lambda} \tau_{\lambda}^m + E_{sky}) d\lambda}{\int E_{0\lambda} d\lambda};$$

将式(4)代入上式, 得

$$A = \frac{V_{total}}{V_{sun}} \tau_{\lambda_c}^m \rho_c; \quad (5)$$

式(5)中, ρ_c 为通道波段内的平均反射率; $\tau_{\lambda_c}^m$ 为通道波段内大气的等效透过率。反射率板的 ρ_c 可以通过标定测量获取。在宁静的大气状态下, 大气等效透过率可通过对太阳的直接辐照测量求得。在不同的太阳天顶角下, 对太阳的直接辐照测量有:

$$V = V_0 \tau^m; \quad (6)$$

式(6)中, V_0 为地球大气外对太阳直接辐照测得的多通道光谱仪的输出; V 为地面上对太阳

辐照测得的多通道光谱仪的输出; m 是大气质量数; τ 为该通道波段大气的垂直透过率. 在太阳天顶角 Z_i 小于 60° 时, $m = \frac{1}{\cos Z_i}$; 由下式求得

$$\cos Z_i = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau_i; \quad (7)$$

式(7)中, φ 为测量点的地理纬度; δ 为太阳赤纬度; τ_i 为测量时的时间角; 这样, 式(6)中的 V_0 及 τ 可以通过多次测量线性回归求得, 即

$$\ln V = \ln V_0 + m \ln \tau. \quad (8)$$

由于太阳是一个较稳定的标准光源; V_0 是大气层外测太阳辐照的仪器输出, 故亦是稳定的. 因此, V_0 的波动值反映了大气的宁静状态, 也表明了由式(8)回归求得的 τ 值的可信度.

在求得 τ^m 后, 由式(5)可得反射率板的反射率 A . 对于不同反射率的反射率板, 可得到一组反射率 A_i 与扫描辐射计输出 X_i .

$$A_i = G X_i + I; \quad (9)$$

由式(9)可回归求出扫描辐射计各通道的定标系数 G, I .

3. 定标试验与结果

定标试验的地区与季节的选择主要考虑大气要处于较为宁静状态. 试验时, 标准反射率板正对太阳. 扫描辐射计的扫描星下点指向与标准反射率板法向夹角要小于 12° , 以减小反射率板反射辐射方向性引入的误差. 反射率板四周围用挡光板来减小环境及天空散射的辐射. 反射率板对天空的视场与多通道辐射计测量天空与太阳总辐照的视场相一致. 辐射定标现场试验照片见本期彩色插页图. 定标时为获得不同的目标辐亮度, 使用一套标定过的反射率板, 其各波段的平均反射率如表 1 所示. 定标时使用不同反射率的目标板, 记录扫描辐射计各波段对应的输出 X_i , 通过式(5)及式(9), 可回归求出扫描辐射计的定标系数.

表 1 标准反射率板的平均反射率数据

Table 1 Average reflectance data of standard reflectance board.

反射率板序号	$\rho(\%)$	通 道			
		CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
1		84.7	80.5	87.8	87.8
2		74.0	72.8	74.4	74.3
3		61.7	60.3	61.9	61.9
4		27.6	26.2	28.5	28.3
5		17.5	17.2	17.6	17.6
6		4.5	4.45	4.6	4.6

定标试验在 1988 年 5 月 3 日至 5 月 5 日进行. 当时的云量约为 3, 能见度为 10 km 左右. 各天测得的大气透过率数据如表 2 所示.

将标准大气从海平面到外层空间的大气透过率数据^[1], 换算到当地地理高度的大气透过率数据, 如表 3 所示.

表 2 数据表明, 定标试验所测得的大气透过率数据在表 3 所示的数据范围内. 同时, 从表 3 可以看到, 各通道的大气透过率存在以下关系:

表 2 各通道大气透过率实测数据
Table 2 Data of atmospheric transmittance in each channel.

时 间	τ			
	通 道			
	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
5月3日上午	0.725	0.792	0.653	0.706
5月3日下午	0.780	0.800	0.668	0.720
5月4日上午	0.641	0.721	0.569	0.632
5月4日下午	0.709	0.751	0.625	0.653
5月5日上午	0.724	0.782	0.637	0.703
5月5日下午	0.757	0.795	0.642	0.685
5月8日	0.718	0.765	0.567	0.686

表 3 标准大气在当地地理高度的大气透过率数据
Table 3 Data of atmospheric transmittance of standard atmosphere
at local geographic altitude.

能见度(km)	τ			
	通 道			
	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
23	0.80	0.85	0.73	0.76
5	0.57	0.66	0.50	0.52

$$\tau_{CH_2} > \tau_{CH_1} > \tau_{CH_4} > \tau_{CH_3}$$

其中, τ_{CH_i} 表示第 i 通道的大气透过率。上述关系式对于表 2 所列数据同样成立。

此外, 表 4 列出了按式(8)回归求得的 V_0 值。由表 4 可见, 尽管各天测得的大气透过率变化较大, 而 V_0 值基本恒定, 反映出大气透过率测量数据是可信的。总辐照与太阳辐照的比值的测量结果见表 5, 比例系数 $K = V_{total}/V_{sun}$ 。

一般情况下, 大气透过率高时, 天空散射辐照分量减少。上述 K 值的差异说明了这一点。由于 K 是随瞬间大气条件和天气状况而变化的量, 因而对于不同波段 K 值的变化量, 需要在今后大量测试数据条件下, 加以分析研究。

根据用户对扫描辐射计动态范围的要求, 对于通道 1 与 2, 动态范围的高端调整在目标反照率是 85% 时的 HRPT 目标信号输出数字量为 1024, 对于通道 3 与 4, 动态范围高端对应的目标反照率 20% 时的 HRPT 输出数字量为 1024, 扫描辐射计各通道的定标系数如表 6 所示。

必须指明, 由于日地距离的变化, 考虑近日点(1月4日)及地球绕太阳运行椭圆轨道的偏心率($e=0.01672$), 于是实际的定标方程为

$$A = G_0 X + I, \quad G_0 = G \cdot h;$$

其中, G 为 5 月 4 日确定的定标系数; I 为截尾系数; h 为修正系数。

$$h = \left(\frac{0.9921 \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \theta} \right)^2,$$

表 4 大气层外多通道光谱仪对太阳辐照测试的 V_0 推算值Table 4 Estimate value V_0 for measurement of solar irradiation in multispectrometer outside atmosphere.

时 间	$V_0(V)$			
	通 道			
	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
5月3日上午	2.434	4.635	5.024	3.531
5月3日下午	2.394	4.553	4.846	3.500
5月4日上午	2.456	4.740	5.042	3.620
5月4日下午	2.361	4.609	4.728	3.662
5月5日上午	2.436	4.550	4.972	3.644
5月5日下午	2.433	4.548	4.89	3.657
5月8日	2.480	4.720	—	3.602
\bar{V}_0	2.428	4.622	4.917	3.603
$\sigma_{n-1}(\frac{\Delta V}{\bar{V}_0})$	1.62%	1.75%	2.43%	1.76%

表 5 总辐照与太阳辐照比值测量结果

Table 5 Measured results of the ratio of total irradiation to solar irradiation.

时 间	K			
	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
5月3日 14:38	1.045	1.159	—	—
5月3日 15:20	1.034	1.14	1.083	1.096
5月3日 16:20	1.094	1.114	1.089	1.094
5月4日 13:52	1.152	1.11	1.156	1.129
5月4日 14:38	1.182	1.15	—	—
5月4日 15:10	1.106	1.10	1.083	1.08

表 6 HRPT 辐射定标系数计算结果

Table 6 Calculated results of radiation calibration coefficients of HRPT.

定 标 系 数	通 道			
	CH ₁	CH ₂	CH ₃	CH ₄
G	8.20×10^{-4}	8.27×10^{-4}	1.94×10^{-4}	1.91×10^{-4}
I	0.0135	0.0064	0.0017	0.0047

$$\theta = \frac{\text{观察日距1月4日天数}}{365.25} \times 360^\circ;$$

G_0 值的年相对变化量约为 $-4.84\% \sim +1.75\%$ 。

4. 误差分析

由式(9)可见, G 的主要误差源是反照率 A , 有

$$\frac{dG}{G} = \frac{dA}{A},$$

而

$$A = \tau^m \cdot \rho \cdot K;$$

其中; $K = \frac{V_{total}}{V_{sun}}$ 可得

$$\frac{dA}{A} = m \frac{d\tau}{\tau} + \ln \tau dm + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dK}{K};$$

其中,

$$\frac{d\tau}{\tau} = -\ln \tau \frac{dm}{m} + \frac{1}{m} \frac{dV}{V} - \frac{1}{m} \frac{dV_c}{V_0}.$$

由于各变量是独立的, 故反照率 A 的相对误差为:

$$\frac{\Delta A}{A} = \pm \sqrt{\sum_i \delta_i^2};$$

式中, δ_i 为误差分析中各误差项 $E(X_i) \Delta X_i$. $Oh_1 \sim Oh_4$ 各通道的反照率相对误差 $\left(\frac{\Delta A}{A}\right)$ 计算结果分别为 $\pm 2.54\% \pm 2.77\% \pm 3.17\% \pm 2.77\%$.

多通道光谱仪对大气透过率的测量, 其精度主要取决于大气的状况. 误差分析表明, 主要误差源为 $\frac{\Delta V_0}{V_0}$, 而 V_0 的精度取决于大气透过率波动状况. 此外, 误差源中总辐照与太阳辐照的比值 K 表明天空散射辐射约占总辐照的 10%. 若测量天空辐照的相对误差为 15%, 所占总辐射的误差比值约为 1.5%.

除上述误差源外, 由于扫描辐射计的光谱响应与多通道光谱仪的光谱响应在实际上存在一定偏差. 实际测量表明, 各光谱通道的相对误差小于 1%. 这将引起定标时反照率的绝对值偏差.

在式(2)~(5)推导过程中, 应用定积分中值定理来简化问题. 实际上由于被积函数 E_{sky} 与 $E_{\lambda} \tau^m$ 的不同, 使 B_{λ} 在波段范围内存在的某 λ_0 ($\lambda_0 < \lambda_c < \lambda_b$, λ_a, λ_b 为该波段的起始波长与终止波长) 取值不同而导致误差. 由于 E_{sky} 仅为太阳辐照的 10% 左右, 而 B_{λ} 在波段范围内的变化约 10%, 因此, 引入的误差估计约为 1%.

综合上述分析, 总的辐射定标的相对误差为 $\pm 5.5\%$.

5. 结 论

卫星入轨后, 经过测试小组对接收的扫描辐射计 HRPT 及 APT 数据测试分析, 认为, 可见、近红外通道对海水及沙漠目标的反照率反演值, 与所掌握的目标特性数据相符.

扫描辐射计的可见、近红外辐射定标试验结果表明, 以太阳为标准光源, 在宁静的大气条件下, 可以对扫描辐射计进行绝对辐射标定. 由于定标时使用了太阳反射光谱辐射, 用星载或机载多通道扫描辐射计对地面目标观测, 可以获得较好的目标光谱特征的反演精度.

致谢——本工作是在龚惠兴研究员指导下进行的. 辐射定标试验得到了中国科学院云南天文台的大力帮助. 除本所人员外, 还有国家气象局及上海卫星工程研究所的同志参加辐射定标试验工作, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] J. E. A. Selby, et al, 1972 Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 Micrometer Computer Code Lowtran 2. **AFCRL-72-0745, AD-763721**,
- [2] Robert H. R. et al, 1973. 12, *A Technique for Correcting ERTS Data for Solar and Atmospheric Effects*, 3rd ERTS Symposium, P1~7.

**RADIATION CALIBRATION TEST FOR VISIBLE
AND NEAR INFRARED WAVEBANDS OF VHRSR ON
FY-1 METEOROLOGICAL SATELLITE**

ZHANG ZHIMIN, ZHENG QINBO

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia, Sinica, 200083, Shanghai, China)

ABSTRACT

In this paper, a method of radiation calibration for visible and near infrared wavebands of Scanning Radiometer is introduced. The calibration principle, test and results are described, and errors analysed. The results of the radiation calibration test indicate that using the sun as a standard light source, under the condition of stable atmosphere, absolute radiation calibration for visible and near infrared wavebands of VHRSR can be performed with a relatively good retrieval accuracy of target spectral feature for radiometers.