

# 目标红外辐射特性测量定标方法研究

樊宏杰, 刘艳芳, 刘连伟, 姚梅, 许振领, 杨淼淼  
(解放军63892部队 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 阐述了定标工作在目标红外辐射特性测量中的重要作用。分别就调焦类成像设备和非调焦类成像设备的定标方法进行了理论分析, 针对不同定标方法的优缺点进行了说明, 定标时通常采用0米定标, 方便且可同时进行所有像元定标。对目标特性测量时定标温度的选择作了分析, 得出结论: 定标间隔不变时, 定标误差随定标温度呈“W”型规律变化, 当定标温度分布于测量温度两侧时, 误差有限, 因此定标温度通常选择在目标等效黑体温度两侧, 且定标温度间隔越小辐射特性测量精度越高。

**关键词:** 红外辐射特性; 辐射特性测量; 定标

中图分类号: TN21 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.05.009

## Study on calibration method of target infrared radiation characteristic measurement

FAN Hong-jie, LIU Yan-fang, LIU Lian-wei, YAO Mei, XU Zhen-ling, YANG Miao-miao  
(63892 Army Unit PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Calibration plays an important role in infrared characteristic measurement. Calibration method of fixed-focus imaging sensor and adjustable focus imaging sensor are theoretically analyzed. Merits and demerits of different calibration methods are introduced. Zero meter calibration method is usually selected, it is convenient and can calibrate all pixels. The selection of calibration temperature is analyzed in target IR characteristic measurement, analysis results show that: when calibration temperature interval is constant, the calibration error changes along "W" shape with calibration temperature; The calibration error is limited when calibration temperature distributes both sides of measurement temperature, so calibration temperature is selected on both sides of equivalent blackbody temperature, and calibration error is smaller when calibration temperature interval is smaller.

**Key words:** infrared radiation characteristic; radiation characteristic measurement; calibration

### 1 引言

要研究目标/背景的辐射特性, 需要进行大量的测量工作, 通过测量可实现以下2个方面的目的: (1) 可研究目标和背景的辐射分布、检验理论模型的计算精度, 促进模型改进, 提高模型的可信度; (2) 可以研究目标与背景辐射特征之间的关系, 考查目标背景的对比如度。而在红外辐射特性测量中, 定标<sup>[1-7]</sup>是一项十分重要且必须的工作, 自然界中的物体、背景或常见的目标均不符合理想的黑体辐射(除了特殊的辐射源, 也仅仅是近似看作黑体)。

设备接收到的辐射为表观辐射特性或等效黑体辐射特性, 不能通过物体的温度精确计算得到, 需要通过测量来得知, 测量时需要确定测量值与目标红外辐射特性的关系, 定标过程就是为了获得物体辐射量与测量设备输出电压或图像灰度之间的关系。定标

基金项目: 总装“十二五”预研项目(No. 510303020403-4)资助。  
作者简介: 樊宏杰(1982-)男, 工程师, 主要从事光电对抗仿真试验技术研究、目标特性研究、目标特性测试研究。E-mail: fanhongjie1982@sina.com  
收稿日期: 2013-09-11

是后期研究目标/背景等辐射特性的重要工作,定标工作能够保证在计算目标、背景辐射亮度或表观温度时的精度。

定标多采用两点定标,定标时选定均匀的黑体辐射源进行,分别设置黑体在两个温度下工作,理论计算得到两温度下的辐射量,并与测量设备测量值共同得到定标系数(斜率与偏置)。定标时,采用不同定标方法,选取不同的定标温度及定标温度间隔会得到不同的定标系数,从而影响辐射特性测量精度,研究这些因素与定标数据之间的关系是提高辐射特性测量精度必不可少的。

## 2 定标方法

### 2.1 测量设备的分类

目前进行波段测量的设备大多数为焦平面阵列成像设备。文中主要针对焦平面阵列成像设备进行定标分析。在成像时,有些设备可进行调焦,在不同的距离处都能成清晰的像,如实验用的热像仪等。有些设备不设调焦功能,只在一定距离外成清晰像,如搜索告警跟踪类的设备,主要是由其用途决定的。定标分别就调焦类设备、非调焦类设备进行分析。

### 2.2 调焦类设备定标

调焦类设备的定标可分为有限距离定标和无限远距离定标。有限远距离定标利用黑体设置在不同温度下进行定标;无限远定标方法利用干净的天空背景进行定标,对于调焦类设备无限远定标需要备有转台或云台的设备,在定标时需要确定俯仰角。

#### 2.2.1 有限距离定标

对调焦类成像设备定标可在 0 m 处定标,也可在其他有限距离处进行定标(如 20 m、30 m、60 m 等,定标时要保证能够清晰成像),在这些有限距离处定标必须保证对面元黑体至少成像 3 × 3 个像元以上,这样考虑的原因是为了保证中心像元处接收到的辐射不包含背景辐射。在 0 m 处定标(将光学系统调焦在无穷远处,系统焦距为  $f$ ) 示意图如图 1 所示。

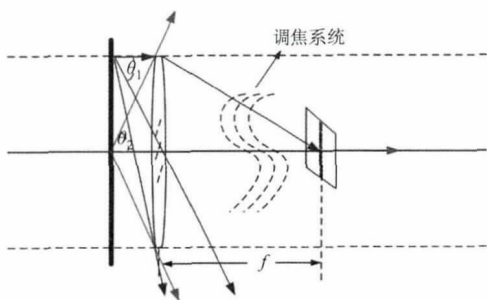


图 1 0 m 定标光路示意图

Fig. 1 0 meter calibration sketch map

从图 1 中可以看出,当黑体置于传感器前无限靠近并充满传感器视场时,视场内黑体上不同部位的辐射对光学系统的张角为 180°,经过光学系统无法会聚成像,其辐射在探测器所有像元处产生相同的辐射通量,这些不同黑体部位在某一像元产生的辐射通量和为该像元接收的总辐射通量,则各像元接收的辐射通量相同。可以这样近似:将面元黑体对系统的辐射近似看作是一个等效空间面(等效为圆形辐射源,直径与系统通光孔径尺寸相同)与探测器两个面之间的辐射,等效空间面的辐射亮度为面元黑体辐射亮度经过光学系统之后的辐射亮度,两个面之间的距离为焦距大小。则该空间面的辐射亮度为:

$$L' = L_{bb} n T_{sys} \quad (1)$$

式中,  $L_{bb}$  为面元黑体的辐射亮度;  $L'$  为等效空间面的辐射;  $T_{sys}$  为光学系统透过率,  $n$  为光学系统的会聚影响因子。

两个面之间的辐射关系如图 2 所示,  $A_d$  为探测器像元面积,  $A$  为等效空间面的面积,  $R$  为等效空间面的半径,  $f$  为焦距。

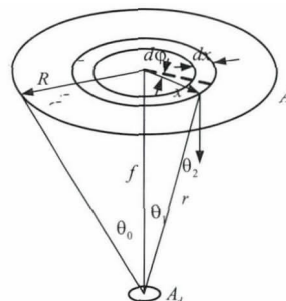


图 2 等效空间面与探测器面关系示意图

Fig. 2 The relationship between equivalent face and detector

根据图 2,等效空间面上微面元在探测器像元上的辐射通量为:

$$d\Phi = L' \frac{A_d dA \cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} \quad (2)$$

在等效空间面上取  $dA = x dx d\phi$ ,且  $\cos\theta_1 = \cos\theta_2 = f/r$  及  $r^2 = x^2 + f^2$ ,考虑到探测器面很小,所有像元具有相同的情况,则等效面在探测器上像元上的辐射通量为:

$$\begin{aligned} \Phi &= L' A_d \int_A \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} dA \\ &= \frac{L_{bb} \pi n T_{sys} A_d R^2}{f^2 + R^2} \\ &= \frac{L_{bb} \pi n D^2 d\Omega}{4(1 + D^{-2})} T_{sys} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $d\Omega$  为像元对应的立体角;  $D$  为系统通光孔径

直径;  $L_{bb}$  为黑体辐射亮度;  $T_{sys}$  为系统透过率;  $D'$  为系统相对孔径。响应输出的电压为:

$$V_{sys} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi D^2 L_{bb}(\lambda) d\Omega}{4(1+D^2)} n T_{sys}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

则最终输出的数字信号为:

$$E_{sys} = U \left( G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi D^2 L_{bb}(\lambda) d\Omega}{4(1+D^2)} n T_{sys}(\lambda) d\lambda + V_b + V_n \right) \quad (5)$$

式中,  $V_b$  表示背景电平;  $V_n$  表示噪声电平;  $U$  表示模数转换系数;  $G$  表示系统增益;  $L_{bb}(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$ ,  $T_{sys}(\lambda)$  取波段平均值, 则可表示为:

$$E_{sys} = U \left( GR \frac{\pi D^2 L_{bb} d\Omega}{4(1+D^2)} n T_{sys} + V_b + N \right) = A L_{bb} + B \quad (6)$$

式中,  $A$ 、 $B$  为响应率和偏置,  $A = UGR \cdot \frac{\pi D^2 d\Omega}{4(1+D^2)} \cdot n T_{sys}$ 。

式(5)也可以写作:

$$E_{sys} = U \left( GR \frac{\pi D^2 L_{bb} d\Omega}{4(1+D^2)} n T_{sys} + V_b + N \right) = A' \frac{n}{1+D^2} L_{bb} + B' \quad (7)$$

式中,  $A' = UGR \frac{\pi D^2 d\Omega}{4} T_{sys}$ ,  $A' = A \frac{1+D^2}{n}$ ,  $B' = B$ 。

对于式(7)可以这样理解: 空间无穷远存在一无穷大的均匀辐射背景, 该均匀背景的辐射亮度为  $L_{bb}' = \frac{n}{1+D^2} L_{bb}$ , 其在成像设备上清晰成像, 每个像元接收的辐射同 0 m 定标时像元接收的辐射通量相同。

改变物体距离, 使面元黑体在视场中清晰成像, 定标距离(物距)为  $u$ , 其光路图如图 3 所示。

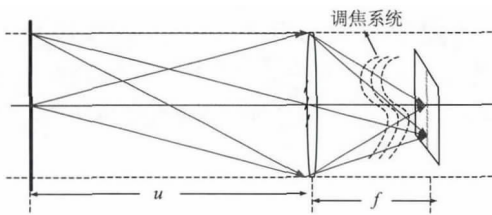


图3 近距离清晰成像示意图

Fig. 3 Short distance imaging sketch map

从图中光路可以计算得到像元上接收到的辐射通量为:

$$\Phi = \frac{\pi D^2 L_i d\Omega}{4} T_{sys} \quad (8)$$

响应后的电信号为:

$$V_{sys} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi D^2 L_i(\lambda) d\Omega}{4} T_{sys}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

则最终输出的数字信号为:

$$E_{sys} = U \left( G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi D^2 L_i(\lambda) d\Omega}{4} T_{sys}(\lambda) d\lambda + V_b + N \right) \quad (10)$$

式中,  $L_i(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$ ,  $T_{sys}(\lambda)$ ,  $T_{ATM}(\lambda)$  取波段平均值, 则可表示为:

$$E_{sys} = U \left( GR \frac{\pi D^2 L_i d\Omega}{4} T_{sys} + V_b + N \right) = A' L_i + B' \quad (11)$$

式中,  $A'$ 、 $B'$  为清晰成像时响应率和偏置。不同距离时(清晰成像情况下)定标公式格式一致, 不同的是不同距离下接收到的相同温度下黑体辐射值不一样, 需要考虑路径辐射及透过率效应。即:  $L_i = L_{bb} \tau_{path} + L_{path} \approx L_{bb}$ ,  $L_{bb}$  为黑体本征辐射亮度,  $\tau_{path}$  为大气路径透过率,  $L_{path}$  为大气路径辐射亮度。

对比式(7)和式(11)形式是一致的, 且有: 0 m 定标可以同时对所有像元进行定标, 而且比较方便, 但是从式(7)可以看出, 输入辐射亮度不容易计算; 而其他近距离的定标只能对部分像元进行定标, 但是定标辐射亮度计算容易。基于 0 m、其他有限距离定标的优缺点可以采用下面方法实现:

首先通过 0 m 定标确定式(6)中的  $A$ , 通过其他近距离(如 10 m)定标确定式(11)中  $A'$ , 通过式  $A = A' \frac{n}{1+D^2}$  得到  $\frac{n}{1+D^2}$  值, 则定标时采用式(7)实现, 这样既兼顾了全像元、清晰成像的要求。

### 2.2.2 无穷远距离定标

利用晴朗天空背景来定标, 主要是考虑该类设备野外使用时定标的方便及快速。将设备调焦于无穷远, 定标示意图如图 4 所示。

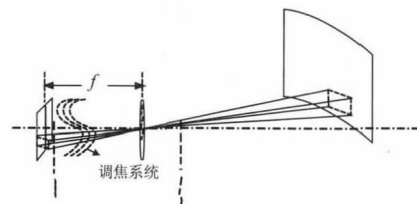


图4 天空背景定标示意图

Fig. 4 Calibration sketch map by sky

通过天空背景定标, 需要知道光学系统的光轴指向、气象条件(温度、湿度、压强、能见度等), 则可

根据下式进行定标:

$$\begin{cases} E_1(i, j) = A(i, j)L(\theta_1, i) + B(i, j) \\ E_2(i, j) = A(i, j)L(\theta_2, i) + B(i, j) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A(i, j) = \frac{E_2(i, j) - E_1(i, j)}{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)} \\ B(i, j) = E_1(i, j) - A(i, j)L(\theta_1, i) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\theta_1, \theta_2$  表示定标时光轴对应的俯仰角;  $E_1(i, j), E_2(i, j)$  表示像元  $(i, j)$  处的灰度;  $A(i, j), B(i, j)$  表示像元的响应率和偏置;  $L(\theta_1, i), L(\theta_2, i)$  表示像元  $(i, j)$  分别在角度  $(\theta_1 + W/2 - iw), (\theta_2 + W/2 - iw)$  下的对应背景的辐射亮度, 通过 LOTRAN 或 MODTRAN 计算得到;  $W$  表示俯仰视场角大小,  $w$  表示俯仰分辨率。

通过天空背景定标的缺点是: 天空背景需是晴朗无云的背景, 通过 LOTRAN 或 MODTRAN 等软件计算的天空背景辐射亮度误差较大, 对于精确测量来说精度较差。

### 2.3 非调焦类设备定标

该类设备观察的对象多为远距离目标, 其景深一般为几百米到无穷远, 在不调焦的情况目标均能清晰成像, 所以一般不设调焦功能, 因此利用其进行辐射测量时, 定标用黑体面积有限, 不能放置太远, 仅限于几十米以内, 则设备成非清晰像, 则该距离下的定标为非清晰成像下的定标。另外为了解决非清晰成像情况, 有时也可以利用一些非常规的定标方法, 如利用天空背景来模拟大面积的黑体, 利用不同仰角系的天空模拟不同温度下的辐射。

#### 2.3.1 有限距离定标

有限距离下的定标对于非调焦类设备来说, 进行 0 m 定标则比较方便, 即将定标用黑体置于成像设备光学系统前使其充满设备的整个视场, 这样作的好处是每个像元都可以进行定标, 该情况下相当于调焦与无穷远处, 定标时的光路如图 5 所示。

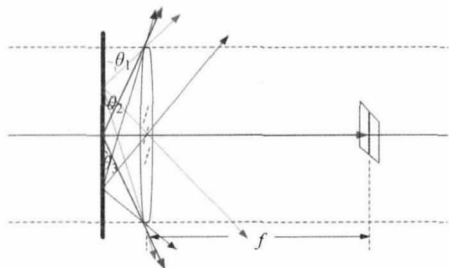


图 5 0 m 定标光路示意图

Fig.5 0 meter calibration sketch map

该类设备不存在调焦功能, 无法求得  $\frac{n}{1 + D^2}$ ,

所以 0 m 定标时只能近似采用式(6)进行定标。

#### 2.3.2 无穷远距离定标

该情况下同样以晴朗的天空背景为定标源, 进行定标, 定标公式同调焦系统。

### 3 定标温度的设置

前面提到对红外成像设备定标一般采用两点定标方法, 其主要是基于成像设备在一定温度范围内响应的线性特性, 一般定标温度(即面源黑体温度)是可以任意设定的, 且两个温度点的温度间隔也是任意的。但是针对红外成像设备这种线性范围因探测象元不同也会不同, 同时每个探测器象元的响应线性有一定的温度适应范围, 或者在不同温度段是线性的而在大温度间隔内表现出非线性的特点。因此为尽可能提高红外辐射特性测量精度, 需研究定标温度和定标温度间隔下对红外成像设备的响应规律, 以确定最佳的定标温度和温度间隔。

实测数据计算用例: 在试验中, 稳定环境温度为 29℃, 在 [10℃, 65℃] 范围内每隔 5℃ 设置黑体温度, 通过红外热像仪录取若干帧红外图像。测量值计算精度以黑体温度为 40℃ 时为比对参考。

a. 分别在比对温度两侧、小于比对温度一侧、大于比对温度一侧选取两个定标温度点, 根据定标温度计算定标系数, 最后根据定标系数、比对温度处的图像数据计算得到定标温度处的黑体辐射亮度, 并与根据普朗克公式计算得到的黑体辐射亮度(40℃ 时黑体辐射亮度为 65.8158 Wm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>) 进行比对, 可得到测量误差。误差计算公式为:

$$\delta = \frac{\Delta}{L(\text{理})} = \frac{|L(\text{理}) - L(\text{测})|}{L(\text{理})} \quad (13)$$

式中,  $\Delta$  为绝对误差;  $\delta$  为相对误差;  $L(\text{理})$  为理论计算辐射亮度;  $L(\text{测})$  为根据定标参数得到的测量辐射亮度。

不同定标温度下的定标误差如表 1 所示。

当定标温度从小于比对温度到包含比对温度、再到大于比对温度的变化过程中, 定标误差的变化规律如图 6 所示, 呈“W”形规律变化, 相对误差分四段变化。这个变化规律可以从图 7 中看出, 探测器的响应曲线服从抛物线规律, 图中虚线为不同定标温度下的定标曲线, 定标温度间隔一定时, 有: 当定标温度均位于测量温度  $T$  左边时, 靠近  $T$  时,  $\Delta$  变小, 则  $\delta$  变小; 当定标温度右移, 其中一个经过参考温度  $T$ ,  $\Delta$  为 0,  $\delta$  为 0; 定标温度继续右移,  $\Delta$  变大,  $\delta$  变大, 到某一个位置达到最大值; 继续右移,  $\Delta$  变小,  $\delta$  变小; 继续右移, 其中另一个定标温度经过比

对温度时,  $\Delta$  为最小值 0,  $\delta$  为 0; 右移,  $\Delta$  变大,  $\delta$  变大。但是当定标温度分布于测量温度两侧时, 误差是有限的, 所以通常定标时, 一般定标温度取值时, 比对温度位于定标温度的中间位置。

表 1 不同定标温度下的定标误差

Tab. 1 calibration error of different calibration temperature

定标温度 / °C	10 20	15 25	20 30	30 40	35 45	40 50	45 55	50 60	55 65
定标系数 A	22.30	23.31	2309	23.34	22.92	21.52	21.52	21.85	22.35
定标系数 B	3389	3344	3351	3357	3358	3477	3456	3429	3384
测量亮度 / ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ )	66.5672	65.5660	65.93	65.8158	66.1173	65.8158	65.8336	66.0938	66.6203
测量误差 / %	1.14	0.38	0.18	0	0.46	0	0.026	0.42	1.22

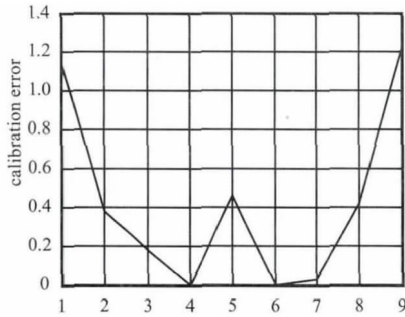


图 6 定标误差随定标温度的变化规律

Fig. 6 Calibration error change disciplinarian by calibration temperature

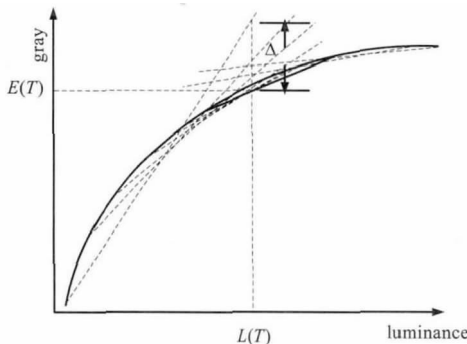


图 7 不同定标温度下的定标曲线与响应曲线的关系

Fig. 7 The relationship between calibration curve of different calibration temperature and response curve

b. 按照 a 中的结论, 将定标温度选在被测对象等效黑体温度范围的两侧, 选择不同的定标温度间隔进行定标, 对比温度处的图像数据计算得到定标温度处的黑体辐射亮度, 并与根据普朗克公式计算得到的黑体辐射亮度进行比对, 可得到测量误差。计算结果如表 2 所示。

表 2 不同定标温度间隔下的定标误差

Tab. 2 Calibration error of different calibration temperature space

定标温度 / °C	35 45	30 50	25 55	20 60	15 65
定标系数 A	22.92	22.39	22.12	22.30	22.26
定标系数 B	3358	3390	3406	3387	3391
测量亮度 / ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ )	66.1173	66.2277	66.2814	66.5681	66.5780
测量误差 / %	0.46	0.63	0.71	1.14	1.16

从表 2 和图 8 可以看出, 当定标温度间隔增大时, 测量精度变差, 所以在测量时定标温度间隔尽量选择小一些。

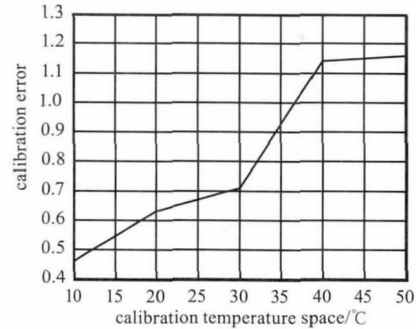


图 8 定标误差随定标间隔的变化规律

Fig. 8 Calibration error change disciplinarian by calibration temperature space

#### 4 结束语

定标是研究目标/背景红外辐射特性的重要工作, 通过定标可以确定目标/背景辐射亮度与成像设备输出灰度之间的关系, 通常采用 0 m 定标, 其比较方便且可同时进行所有像元的定标。定标温度间隔不变时, 定标误差的随定标温度呈“W”形规律变化。当定标温度分布于测量温度两侧时, 误差有限, 通常定标时, 测量温度位于定标温度的中间位置, 同时在辐射特性测量时为了提高测量精度, 并采用尽量小的定标温度间隔。

#### 参考文献:

[1] ZHAO Xiaoyi, ZHANG Wei, XIE Xufen. Study of relationship between absolute calibration and relative calibration [J]. Infrared 2010, 31(9): 23-29. (in Chinese)  
赵晓熠, 张伟, 谢蓄芬. 绝对辐射定标与相对辐射定标的关系研究[J]. 红外 2010, 31(9): 23-29.

[2] ZHANG Lei, ZHENG Xiaobing, LI Shuang, et al. High accurate calibration of optical radiation at middle infrared and far infrared spectrum [J]. Infrared Technology 2006, 28(3): 178-183. (in Chinese)  
张磊, 郝小兵, 李双, 等. 高精度中远红外辐射技术研究[J]. 红外技术 2006, 28(3): 178-183.

- [3] ZHAO Yanhua. Study on the relative radiometric calibration method of mid wave infrared area array remote sensing camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 31(3): 48-54. (in Chinese)  
赵艳华. 中波红外面阵遥感相机相对辐射定标方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2006, 31(3): 48-54.
- [4] LI Youping, YU Bingxi, WANG Yupeng, et al. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)  
李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 822-828.
- [5] TONG Jinjun, RONG Zhiguo, QIU Kangmu, et al. On-board real-time absolute radiometric calibration for thermal infrared band of FY-2B [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(4): 467-471. (in Chinese)  
童进军, 戎志国, 邱康睦, 等. FY-2B 热红外通道星上实时绝对辐射定标 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 467-471.
- [6] HU Xiuqing, RONG Zhiguo, QIU Kangmu, et al. In flight radiometric calibration for thermal channels of FY-4C meteorological satellite sensors using qinghai lake water surface radiometric calibration site [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(5): 328-333. (in Chinese)  
胡秀清, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖水面辐射校正场对 FY-4C 气象卫星热红外传感器进行绝对辐射定标 [J]. 遥感学报, 2002, 6(5): 328-333.
- [7] HU Xiuqing, ZHANG Liyang, ZHENG Zhaojun, et al. FY-3A multi-detector radiometric calibration for infrared band of medium resolution spectral imager [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1973-1979. (in Chinese)  
胡秀清, 张里阳, 郑照军, 等. FY-3A 中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1973-1979.