

文章编号:1001-9014(2006)06-0439-04

# 机载热红外扫描仪机上定标系统研究

陈木旺, 亓洪兴, 毛洁娜, 龚玉梅

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**机上定标是定量遥感的最基本环节,本文在阐述红外扫描仪机上定标原理的基础上,结合实验详细分析了定标系统的几种影响因素:黑体的辐射率、测温精度和测温传感器的热响应时间,并给出了相应的实际解决方法及机上红外定标系统的设计原则。

**关键词:**红外遥感;定标黑体;反演

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A

## STUDY ON ONBOARD CALIBRATION SYSTEM OF AIRBORNE THERMAL INFRARED SCANNER

CHEN Mu-Wang, QI Hong-Xing, MAO Jie-Na, GONG Yu-Mei

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The onboard calibration system is the most basic factor of quantitative remote sensing. Based on the description of the onboard calibration theory and experiments, the effect factors on the calibration system were analyzed, including blackbody emission, temperature measurement precision and temperature sensor response time. Then the solution to these effects and the design principle of the onboard calibration system were given.

**Key words:** infrared remote sensing; calibration blackbody; retrieval

### 引言

遥感数据量化是当前遥感科学发展的前沿,其中,传感器定标是遥感数据量化处理中最基本环节,是指建立传感器每个探测器所输出信号的量化值与该探测器对应像元内的实际地物辐射量度值之间的定量关系,其精度直接影响到遥感数据的可靠性和精度。机载遥感的定标可分为三类:实验室定标、飞行内定标(机上定标)和场地外定标<sup>[1]</sup>。其中机上定标主要是为了减小遥感仪器自身性能的变化带来的影响,如光学镜面的沾污会使光学效率降低,探测器的老化会影响探测器的响应率;对于红外扫描仪,其探测器除了响应地物目标的辐射量,也会响应仪器腔体进入视场内的辐射量,也就是说扫描仪腔体的温度变化会影响到探测器的输出;同时,光导型热红外探测器对温度特别敏感。因此在量化遥感中红外扫描仪的机上定标系统的重要性显而易见。

### 1 红外扫描仪机上定标系统及原理

机载热红外扫描仪的机上定标系统通常由2个温度不同且已知的平面黑体组成,分别安装在扫描仪地物窗口的两侧,其大小尺寸充满视场,如图1所示。工作时将2个黑体的温度分别控制在地物目标的最高和最低的亮度温度附近(因此也常将这2个黑体分别称为高温黑体和低温黑体)。扫描仪获取地物目标的辐射量化值  $DN_o$  的同时,也采集高低温黑体的辐射量化值  $DN_{BB}$  和相对应的温度  $T_{BB}$ 。当被测目标的亮度温度  $T_o$  (不考虑大气的衰减等)在常温附近时,热红外波段的辐射和绝对温度近似成正比,因此  $T_o$  和其量化值  $DN_o$  之间的关系可近似由式(1)表示<sup>[2,3]</sup>:

$$DN_o = \frac{(DN_{HBB} - DN_{LBB})[T_o - \varepsilon T_{LBB} - (1 - \varepsilon)T_{HR}]}{\varepsilon(T_{HBB} - T_{LBB})} + DN_{LBB}, \quad (1)$$

由式(1)可得:

收稿日期:2005-11-28,修回日期:2006-05-18

基金项目:国家海洋局(020201)资助项目

作者简介:陈木旺(1979-),男,福建漳州人,在读博士生,主要从事机械成像光谱技术研究。

Received date: 2005-11-28, revised date: 2006-05-18

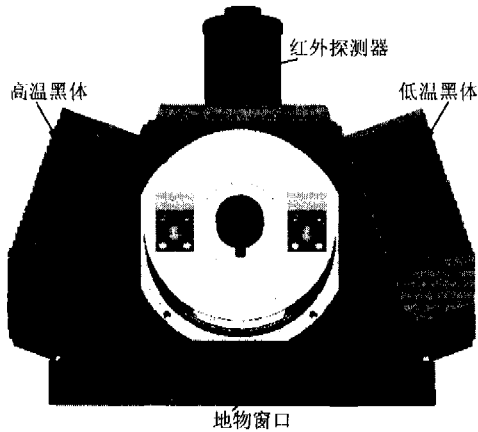


图1 红外扫描仪中高低温定标黑体的安装示意图

Fig.1 Installation of high and low temperature calibration blackbodies in infrared scanner

$$T_O = \frac{\varepsilon(T_{HBB} - T_{LBB})(DN_O - DN_{LBB})}{DN_{HBB} - DN_{LBB}} + \varepsilon T_{LBB} + (1 - \varepsilon)T_{BR} \quad (2)$$

其中  $DN_{HBB}$  表示红外扫描仪扫描到高温黑体时输出的量化值;  $DN_{LBB}$  表示红外扫描仪扫描到低温黑体时输出的量化值;  $DN_O$  表示红外扫描仪扫描到地物目标时输出的量化值;  $\varepsilon$  表示高低温黑体的比辐射率, 认为它们是相等的;  $T_{BR}$  表示红外扫描仪内部腔体的等效亮度温度;  $T_{HBB}$  表示高温黑体的实际温度;  $T_{LBB}$  表示低温黑体的实际温度。

## 2 定标系统分析

由式(1)或式(2)可知, 该定标公式与电路的增益或偏移无关, 在一定程度上大大降低了红外探测器调理电路的设计难度, 实际上是将该设计难度和工作环境的苛刻要求转移到定标系统的设计上, 因此要求定标系统满足一定的条件, 从定标公式可看出, 定标的精度主要与黑体的比辐射率及其测温性能有关。

### 2.1 黑体的比辐射率

由于自然界中不存在理想的黑体, 即比辐射率不可能为 1, 而且在实际应用中, 受工艺、体积、成本等的限制, 比辐射率一般不高, 如美国 MODIS 机载模拟器 MAS 机上定标黑体红外波段的比辐射率仅为 0.94<sup>[2]</sup>, 由式(2)可知, 黑体表面会反射周围的环境辐射(其亮度温度等效为  $T_{BR}$ )的辐射, 这将在系统定标中引入误差, 如果能保持扫描仪的工作环境特别是温度不变, 则由此引起的误差为一常量, 在一般应用中可以忽略, 但在定标精度要求比较高的情况下, 则需考虑红外扫描仪内部腔体的等效亮度温度  $T_{BR}$  的辐射。  $T_{BR}$  可用如下方法等效求出: 在现有的定

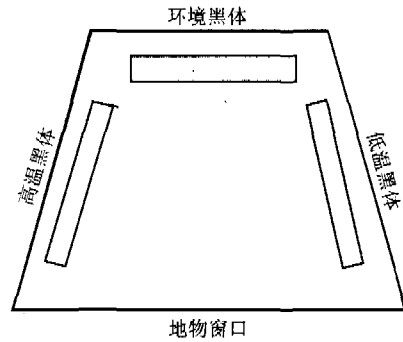


图2 环境黑体的安装示意图

Fig.2 Installation of environmental blackbody

标系统上增加一个环境黑体(其温度随着扫描仪腔体的温度变化而变化), 安装在扫描仪的天顶窗口, 使得高低温黑体的位置关于环境黑体左右对称, 具体如图 2 所示, 并且使高低温黑体的温度满足式(3)

$$T_{HBB} - T_{EBB} = T_{EBB} - T_{LBB} \quad (3)$$

其中  $T_{EBB}$  为环境黑体的实际温度。

设环境黑体的比辐射率为  $\varepsilon$ , 其反射的周围辐射中有高温黑体、低温黑体和扫描仪内部腔体三部分辐射, 设为  $a\varepsilon(1 - \varepsilon)T_{EBB}$ 、 $b\varepsilon(1 - \varepsilon)T_{LBB}$ 、 $c\varepsilon(1 - \varepsilon)T_{EBB}$  (不考虑热辐射和绝对温度的比例系数, 直接用绝对温度表示对应的热辐射), 则

$$a + b + c = 1 \quad (4)$$

由于高低温黑体的位置是关于环境黑体对称, 所以有

$$a = b \quad (5)$$

因每个黑体要足够大以充满扫描镜的通光口径, 则扫描仪腔体基本上是由三个黑体组成, 当扫描到高温黑体时, 探测器接收到的主要是高温黑体的辐射及其反射环境黑体的辐射, 低温黑体的辐射因被扫描镜的背面挡住而对高温黑体的反射辐射没有贡献, 也就是说高温黑体只能反射邻近的环境黑体的辐射; 同理在扫描到低温黑体时, 低温黑体也只能反射环境黑体的辐射, 故可认为  $T_{BR}$  的辐射就是环境黑体自身的热辐射和其反射的周围辐射之和, 则有

$$T_{BR} = \varepsilon T_{EBB} + (1 - \varepsilon)(aT_{HBB} + bT_{LBB} + cT_{EBB}) \quad (6)$$

由式(3)~式(6)可以求得:

$$T_{BR} = T_{EBB} \quad (7)$$

即  $T_{BR}$  可以用环境黑体的温度  $T_{EBB}$  进行等效。

### 2.2 黑体的测温精度

红外扫描仪的系统灵敏度一般用噪声等效温差 NETD 来衡量, 表示当目标和背景均为黑体, 且热红外信号的信噪比等于 1 时, 目标与背景的温差  $\Delta T$ 。在热成像系统中, 一般认为信噪比为 2.25 对于

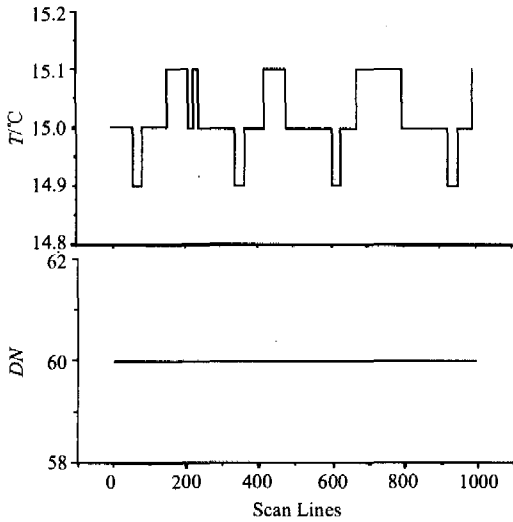


图3 NETD=0.1K的扫描仪记录的黑体温度及其辐射 DN 值之间的关系

Fig.3 Relation between low-temperature blackbody temperature and digital number when NETD equal to 0.1K

50% 的概率完成探测及识别任务的要求是足够的<sup>[4]</sup>,因此可认为扫描仪系统的温度分辨率为  $2.25 * NETD$ .

由式(2)可知,为了能准确反演目标的亮度温度,高低温黑体的温度值  $T_{BB}$  和相应的辐射量化值  $DN_{BB}$  必须一一对应,否则由此反演得到的目标亮度温度  $T_o$  和  $DN_o$  之间将造成误差,影响  $T_o$  反演的精度.因 DN 值对应于扫描仪系统的 AD 量化位数,AD 量化位数是由扫描仪系统的温度分辨率决定的,所以要求黑体的测温精度和系统的温度分辨率相当,即要达到  $2.25 * NETD$  的精度.

图3和图4分别表示同一测温精度的黑体在不同 NETD 的红外扫描仪下记录的温度及相应 DN 值变化情况.其中黑体的测温精度为  $0.1^{\circ}C$ ,控温精度为  $\pm 0.2^{\circ}C$ ,扫描仪的 NETD 分别为  $0.1K$  和  $0.006K$ .比较这两图,不难发现在低灵敏度的扫描仪中,由于低温黑体的温度变化和扫描仪的 NETD 相当,扫描仪分辨不出低温黑体的温度变化情况,因此其辐射 DN 值不变;在高灵敏度的扫描仪中,低温黑体的辐射 DN 值明显地随温度变化而变化,且温度值和 DN 值之间不是一一对应关系.当定标系统采用硬件箝位时,该现象可以通过获取的图像直观的反映出来——将获取的红外信号箝位在低温黑体上,则图像灰度值就会随着低温黑体温度的变化而变化,当目标是比较均匀的物体时,反映在图像上就是沿飞行方向的明暗条纹<sup>[5]</sup>,如图5所示.

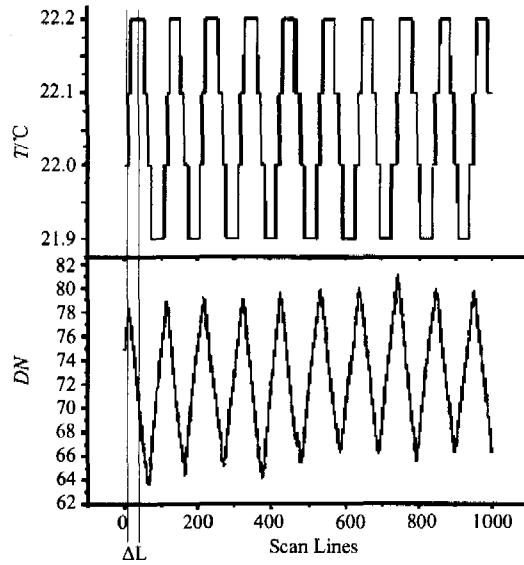


图4 NETD=0.006°C的扫描仪记录的黑体温度及其辐射 DN 值之间的关系

Fig.4 Relation between low-temperature blackbody temperature and digital number when NETD equal to 0.01

### 2.3 黑体的测温响应时间

由图4可发现,虽然黑体 DN 值随着其温度变化而变化的,周期一致,但相位不同,前者超前后者一个固定行数  $\Delta L$ .这是因为红外探测器比黑体所用的温度传感器响应速度快引起的.红外探测器的响应时间为  $\mu s$  级,可以保证扫描仪扫描到第 L 行时记录的 DN 值即对应于当前黑体的实际温度,“所见即所得”;而一般的接触温度传感器的响应时间比较长并且与被测物体有关,如被测物体为铝材料时,AD590 的响应时间为  $2.4s$ ,则在扫描到第 L 行时同步记录的温度值不是当时黑体的实际温度,而是对应于扫描到第  $(L - \Delta L)$  行时的温度值.即  $\Delta L$  所用的扫描时间即为响应时间  $t_r$ ,其关系如下式所示

$$t_r = \frac{\Delta L}{S} \tag{7}$$

式中 S 为扫描仪工作时的扫描率.

因此要利用式(2)计算反演目标的亮度温度,必须先求得黑体测温的响应时间  $t_r$ ,以建立起温度值和 DN 值之间正确的对应关系,则式(2)和式(7)应分别改为

$$DN_{O(L)} = \frac{(DN_{HBB(L)} - DN_{LBB(L)}) [T_{O(L)} - \varepsilon T_{LBB(L+\Delta L)} - (1 - \varepsilon) T_{BR(L+\Delta L)}]}{\varepsilon (T_{HBB(L+\Delta L)} - T_{LBB(L+\Delta L)})} + DN_{LBB(L)} \tag{8}$$

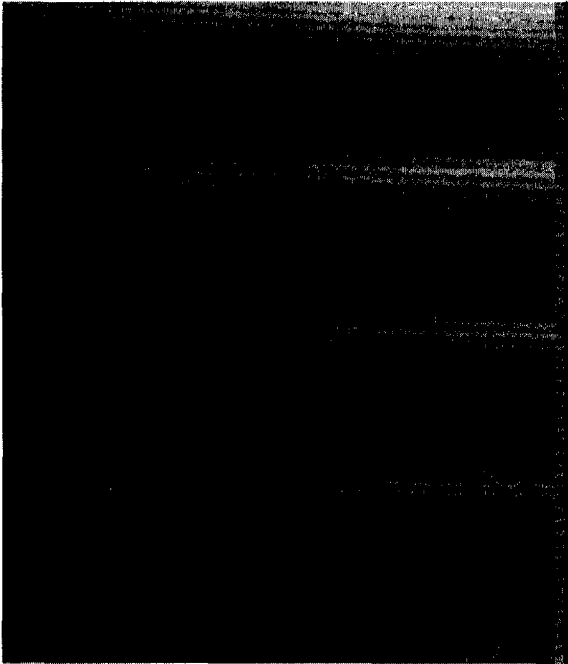


图5 低温黑体变化引起的明暗条纹  
Fig.5 Stripes affected by blackbody temperature variation

$$T_{O(L)} = \frac{\varepsilon(T_{HBB(L+\Delta L)} - T_{LBB(L+\Delta L)})(DN_{O(L)} - DN_{LBB(L)})}{DN_{HBB(L)} - DN_{LBB(L)} + \varepsilon T_{LBB(L+\Delta L)} + (1 - \varepsilon)T_{BR(L+\Delta L)}} \quad (9)$$

其中  $DN_{(L)}$  表示扫描仪扫描到第  $L$  行时的获取的  $DN$  值;  $T_{(L+\Delta L)}$  表示扫描仪扫描到第  $(L + \Delta L)$  行时同步记录的黑体温度值.

### 3 结语

通过上述分析可知,要满足红外扫描仪机上定标的要求,除了减小定标黑体比辐射率低引起的误

差之外,其测控温的精度特别是测温精度更为重要.首先必须保证测温精度应与扫描仪的温度分辨率  $2.25 * NETD$  相当,严格同时记录黑体的温度值和相应的  $DN$  值;在不能绝对保证黑体的控温精度和  $2.25 * NETD$  相当时,应充分考虑测温传感响应时间的影响,利用式(7)和式(8)进行修正,确保定标精度.

由于受各种因素的影响,很难保证机载红外扫描仪机上定标精度,本文通过对几种影响因素的分析并提出相应的解决方法,对机上红外定标系统的设计具有很好的指导意义.

### REFERENCES

- [1] MA Ge-Nai. *Conspectus of Remote Sensing* [M]. Beijing: Beijing University Press(马蔼乃. 遥感概论. 北京:北京大学出版社), 1993. 1.
- [2] Christopher C Moeller, Patrick S Grant, Dan D Laporte, et al. Blackbody emissivity considerations for radiometric calibration of the MODIS airborne simulation (MAS) thermal channels[J]. *SPIE*, 1996, **2820**:44—55.
- [3] HUANG Ye, FANG Yong-Hua, XUN Yu-Long, et al. Calibration methods of infrared spectrum radiometer at various temperatures and background temperature adjustment [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄焯, 方勇华, 荀毓龙. 红外光谱仪多点定标方法及环境温度校正. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2):131—134.
- [4] Campana, Stephen B. *Passive Electro-Optical Systems* [M]. *ERIM and SPIE Press*, 1993, 38.
- [5] CHEN Mu-Wang, QI Hong-Xing, GONG Yu-Mei, et al. Analysis of effect of calibration blackbody temperature stability on the infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering* (陈木旺, 元洪兴, 龚玉梅, 等. 定标黑体的温度稳定性对热成像影响分析. *红外与激光工程*), 2006, **35**(6):652—654.