

文章编号: 1007 4619(2006)05 0616 08

# 卫星光学传感器全过程辐射定标

乔延利, 郑小兵, 王先华, 张黎明, 易维宁, 王乐意

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 安徽 230031)

**摘 要:** 光学传感器全过程定标, 就是对传感器从研发到使命终结整个过程的检测与定标, 它包括在传感器研制过程中在实验室利用人工源和室外自然源对其辐射特性进行检测和定标, 也包括建立与传感器一起工作的星上定标系统装置, 以便当卫星发射升空传感器开始正常工作后, 定期地应用星上定标系统对传感器响应的变化进行相对或绝对的定标, 全过程定标同时包括在轨运行期间采用基于陆地(或海面)特性的“替代定标”, 或借助其他卫星进行的“交叉定标”, 最终依据定标结果来确定传感器使命的终结。

全过程定标是一个系统实验过程, 提高传感器应用效益是其目的, 提高定标精度是目标, 标准及标准传递是贯穿全过程定标的主线, 为此而发展的定标系统和方法是全过程定标的技术支撑, 本文作者及其研究室的工作涉及上述全过程的内容, 本文首次将全过程定标所涉及的内容系统地予以阐述。

提高定标的精度不仅要系统硬件构成上考虑, 如高精度低温绝对辐射计、传递标准探测器、积分球、标准板等, 更需要从方法和实验上解决问题, 如标准传递过程误差源的分析与控制, 大气空间中辐射传输衰减校正模型以及相关的实验等。

**关键词:** 光学传感器; 全过程定标; 定标标准与精度; 定标方法与实验

**中图分类号:** TP702 **文献标识码:** A

## Whole Process Radiometric Calibration of Optical Remote Sensors

QIAO Yan-li ZHENG Xiao-bing WANG Xian-hua ZHANG Liming YI Wei-ning WANG Le-yi

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences Anhui Hefei 230031, China)

**Abstract** Whole process radiometric calibration of optical remote sensors is testing and calibrating sensor through their lifetime. It includes testing and calibrating sensor with indoor artificial radiation sources or outdoor natural radiation sources in the research and development process and establishing on board calibration system apparatus which will be used as periodically absolute and relative calibration for sensors being working after launch. Moreover whole process radiometric calibration of optical remote sensors also includes vicarious calibration based on land(or sea) surface and cross calibration with other satellite sensor. At last the result of calibration can be used as a criterion determining whether a sensor is out of function or not.

Whole process radiometric calibration is an experiment process. The intention is to aggrandize its application and aim is improving its accuracy. Some calibration systems and techniques have been developed for whole process radiometric calibration based on standard and standard transfer. The research works in our laboratory involve all contents of whole process radiometric calibration. We will introduce that completely.

Improving calibration accuracy depends not only on hardware such as high accuracy cryogenic radiometer, transfer standard detector, integrating sphere and standard panel but also on techniques such as error source analysis and control in standard transfer process, determination of atmospheric radiative fluxes model and

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 中国科学院“十五”支撑技术项目(编号: 42201010502)“可见-红外光谱定标技术”资助, 中国科学院百人计划项目(编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目(编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目(编号: KJSX0401)。

作者简介: 乔延利(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 1982年毕业于北京邮电大学计算机通讯专业, 1984年在中国科学院安徽光学精密机械研究所获硕士学位, 目前主要从事光学遥感辐射定标、大气校正及地物波谱特性方面的研究工作。

relational experiment etc

**Key words** optical sensor whole process radiometric calibration; radiometric standard; calibration method and experiment

## 1 引言

辐射标准精度的提高、高精度标准的传递、对测量设备实施辐射定标以及对卫星传感器所进行的辐射校正, 均是为了提高遥感信息定量化应用的水平, 首先作为光学遥感定量化探测所依赖的辐射标准精度必须提高, 如低温绝对辐射计标准系统的建立<sup>[1-3]</sup>; 基于高精度辐射标准传递及应用定标系统, 确定遥感探测器测值与辐射参量之间的转换关系, 是遥感系统不可缺少的技术和实验研究过程; 然而, 几乎所有卫星传感器在发射过程及在轨长期运行中, 其在实验室或地面所确定的定量化关系均会因种种原因发生变化, 利用天上定标和以地面参照的实验修正的“校正场校正方法”<sup>[4-5]</sup>是对这些变化进行重新定标和数据校正的有效方法之一。

辐射标准及其传递、辐射定标及辐射校正, 从基础上讲是辐射测量学的主要内容, 并在构成这一完整的实验系统和实施过程中, 还涉及大气光学、电子学、材料学以及相关学科技术等; 从遥感应用的角度上讲, 这一实验过程所要解决的问题是: 从遥感探测的数值中获取辐射参量; 对比分析不同地点或不同时间所获得的遥感数据; 对比分析由不同遥感探测器所获得的数据。

## 2 辐射标准及其传递

### 2.1 辐射标准

#### 2.1.1 基于黑体炉的辐射标准

黑体辐射标准是基于普朗克定律, 其准确度取决于构成黑体的材料、腔形、发射率、温度的精确测量和控制以及背景辐射的抑制等。目前在遥感辐射定标中仍普遍采用的 0.25—2.5 $\mu\text{m}$  辐射传递标准 (如 1000W 标准辐射照度溴钨灯、标准辐射亮度灯) 均是通过国家计量院 (所) 所持有的“金点”黑体基准传递的, 传递实际上是一个测量比对过程, 自然也是引入测量误差的过程, 目前的 1%—5% 的不确定度仍是该类辐射传递标准较高的指标。

#### 2.1.2 基于绝对辐射计测量的标准

通常所讲的绝对辐射计也是基于普朗克定律,

即由无波长选择性的黑体探测器接受光辐射的温升与由电加热的温升的平衡, 通过电学计量来确定光辐射的量值。热噪声、背景辐射等是影响任何绝对辐射计的主要因素。20 世纪 90 年代以来发展起来的低温绝对辐射计 (Cryogenic Absolute Radiometer) 采用了液氮制冷和超导技术, 根本上解决了背景辐射和接触欧姆噪声 (热噪声) 等关键技术问题, 使绝对辐射测量的精度一下提高了 3—4 个数量级<sup>[2]</sup>。1997 年中国科学院安徽光学精密机械研究所在国内首先引进 CryoRad II 低温绝对辐射计主机, 指标见表 1。1998 年率先完成基于低温绝对辐射计的高精度辐射标准传递系统<sup>[3]</sup>。

表 1 低温辐射计主要参数

Table 1 The characters of CryoRad II

光谱范围 $\mu\text{m}$	0.25—50
功率范围 W	25—250
接收器响应时间 ( $1/e$ ) /s	4.6
接收器响应率 $(\text{K}/\text{mW})$	2.0
绝对准确度 /%	< 0.02
腔体吸收率 /%	> 99.99
液氮保持时间 h	> 40

### 2.2 标准的传递及定标系统的建立

辐射定标系统的建立就是辐射标准的传递和应用, 是一个系统实验研究过程, 通常它需依据国家计量单位的辐射标准载体 (标准灯), 或经过计量比对已知准确度的绝对辐射测量系统, 解决在建立相应的遥感辐射定标系统时必须涉及的技术问题和处理方法。具体说, 辐射标准的传递涉及标准的再现、传递载体的选择和研制技术、比对测量、过渡系统或介质等, 简而言之是各个环节误差源的控制<sup>[6]</sup>。

#### 2.2.1 标准灯辐射定标系统

标准灯辐射定标系统由标准灯、标准板及相应的辅助系统构成。遥感辐射定标系统中常用的是辐射照度标准灯。标准灯作为辐射标准的载体, 要以严格的再现条件和工作环境来保证其传递精度, 如直流供电电流的波动需小于 0.05% 等。标准板是从辐射照度转换到辐射亮度的参照标准, 它多是一块朗伯特特性较好的漫反射板。漫反射板的材料常用

的有 BaSO<sub>4</sub>, Hebn 及 Spectralon 等,高精度的标准灯辐射定标系统需要给出标准板的 BRDF 校正系数。表 2 是中国科学院安徽光学精密机械研究所实验室标准灯辐射定标系统所达到的精度水平。

表 2 标准灯辐射定标系统误差源分配表

Table 2 The error list of calibration lamp based standard system

误差源	误差范围 %	综合不确定度 %
标准灯	1.5—5.0	3.4—5.8
电源系统等	< 0.2	
几何条件	< 1.0	
标准板	< 2.0	
BRDF 校正	< 2.0	

## 2.2.2 积分球辐射定标系统

积分球辐射定标系统常用于航空、航天等大口径、大视场遥感仪器的辐射定标。它的特点是输出能量大,面均匀性和角度特性(朗伯性)均优于标准灯系统。积分球辐射源的关键是要解决相对大输出面的空间和角度均匀性问题。实验研究表明,均匀性指标虽然与相对孔径比(积分球直径与输出孔直径之比)有关,但有效地解决一次反射光的影响,可在接近 1:2 孔径比下达到优于 0.5% 的均匀性指标。积分球辐射源由于其内壁多次漫反射、开口位置、大小及其他构件的综合作用,不可能(也无必要)在球内设置标准辐射源(如通量标准灯等),而构成较高精度的“标准”积分球,通常在积分球内设置多只高辐射效率的石英溴钨灯,构成一高辐射亮度的辐射源,而该辐射源的准确值必须通过标准传递或称为预定标的过程来获得。System 1216 积分球定标系统是笔者 1998 年建立的,其主要结构参数见表 3。

表 3 System 1216 积分球定标系统参数

Table 3 The parameter of integrating sphere calibration system (system 1216)

参数描述	参数及指标
积分球直径 /mm	120
开口直径 /mm	46
内壁漫反射材料	F <sub>4</sub> +BaSO <sub>4</sub>
辐射源 W	12×250
峰值辐射亮度	~150
电源	4X DH 2000 直流源
冷却方式	水冷+风冷
工作方式	水平、垂直

预定标系统及预定标实验过程决定积分球定标源精度的水平,表 4 为基于标准灯和过渡积分球预定标系统所达到的精度;表 5 是基于由低温绝对辐射计传递的硅光二极管陷阱标准器在可见至近红外波段、带宽 10nm 左右的分离波长处的对积分球辐射源的传递精度。

表 4 System 1216 积分球辐射定标系统误差分配表  
(基于标准灯、过渡积分球预定标系统)

Table 4 The error list of system 1216 (based on standard lamp and transition integrating sphere)

误差源	误差范围 %	综合不确定度 %
标准灯	1.6—5.0	2.2—5.5
几何误差	1.0	
积分球辐射源	0.1	
比对测量误差	1.0—2.0	

表 5 System 1216 积分球辐射定标系统误差分配表  
(基于硅光二极管陷阱)

Table 5 The error list of system 1216  
(based silicon diode trap)

误差源	误差 %	综合不确定度 (可见近红外波段) %
积分球辐射源	0.1	1.01
绝对测量误差	1.0	

## 3 辐射定标

辐射定标是与航天、航空及地面遥感测量仪器系统直接有关的一个实验研究过程,定标过程必然会引入误差。根据不同类型遥感仪器确定辐射定标的内容及相关定标程序,是评价遥感仪器和进行定量化遥感数据处理的重要依据,处理模型、算法等必须在统一规范化的条件下完成。

### 3.1 辐射定标的主要内容

#### 3.1.1 暗电流

所谓仪器系统的暗电流(或是与瞬时视场内目标本征辐射量无关的附加分量)与波长、通道函数和工作(扫描位置)状态有关。当然,噪声特性会随时间或环境条件改变。作为实验室定标的基本特性,数据总是与其变化相关的,所以对任何实际应用

条件下测量数据的处理仍是必要的。实验和处理过程如下:

波长	$\lambda_1(\Delta\lambda_1)$	$\lambda_2(\Delta\lambda_2)$	...	$\lambda_j(\Delta\lambda_j)$
Scan 1	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$
Scan 2	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$
...	...	...	...	...
Scan $n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	$x_{nj}$

平均值:

$$\bar{x}_j(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (1)$$

离散度 (均方差):

$$d_j(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n X_{ij}^2 - n [\bar{x}_j(\lambda)]^2 \right]} \quad (2)$$

### 3 1 2 响应线性

遥感辐射测量仪器所探测的目标,基本上可由相互独立的 4 个分量来描述,即空间、光谱、时间和偏振特性,综合响应表现为:

$$R(\lambda) = R_0(\lambda) \cdot R_{xy}(\theta, \phi) \cdot R_S(\lambda) \cdot R_t(t) \cdot R_p(\lambda) \quad (3)$$

式中,  $R_0(\lambda)$  对应仪器从辐射量到数值的转换关系;  $R_{xy}(\theta, \phi)$  相对空间响应函数;  $R_S(\lambda)$  仪器相对光谱响应函数;  $R_t(t)$  相对时间变化的响应函数;  $R_p(\lambda)$  相对偏振响应函数。

式(3)仅是定义了仪器基于线性的响应关系,即对于入射的辐射量  $L$  所对应的输出  $V$  之间满足下式:

$$V(\lambda) = R(\lambda) \cdot L(\lambda) + V_0(\lambda) \quad (4a)$$

式中,  $V_0(\lambda)$  为系统的偏置分量。

遥感仪器的响应线性定标或者线性分析的主要目的,是确定其输出相对入射辐射变化的对应关系,并非要求系统的输出与输入之间必须是线性关系,常用的非线性描述如下:

$$V(\lambda) = R_1(\lambda) \cdot L(\lambda) + R_2(\lambda) \cdot L^2(\lambda) + V_0(\lambda) \quad (4b)$$

$$V(\lambda) = \log[R(\lambda) \cdot L(\lambda)] + V_0(\lambda) \quad (4c)$$

### 3 1 3 光谱响应

光谱响应定标与辐射定标是不可分的两个部分,实际的遥感仪器多少都存在名义带宽外的光谱响应,这是遥感数据偏差的主要来源,因而,光谱响应线性和带宽是光谱响应定标的主要内容,光谱响应的一般描述如下式:

$$V(\lambda_i) = R_0 \int_{\lambda_0}^{\infty} R_S(\lambda, \lambda_i) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式中,  $R_0$  和  $R_S(\lambda, \lambda_i)$  是仪器相对光谱响应函数,  $\phi(\lambda)$  是入射通量。

对于理想光谱通道 (矩形分布):

$$\Delta\lambda_i = \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} d\lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i \quad (6)$$

对于可以近似表述为高斯形分布的非理想光谱通道:

$$\Delta\lambda_i = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda, \lambda_i) d\lambda = ch(\lambda_i) \quad (7)$$

$$R(\lambda, \lambda_i) = \exp[-(\lambda - \lambda_i)^2 / 288\sigma^2]$$

对于非理想、非高斯形分布的一般描述为:

$$\Delta\lambda_i = ch(\lambda_i) = \delta \sum_{j=1}^n R(\lambda_j, \lambda_i) \quad (8)$$

### 3 1 4 辐射响应

辐射响应是综合遥感仪器的各种传递因素,也是确定数据定量转换的参数。辐射响应的定标或检定须结合辐射定标源与仪器的相对关系来描述:

(1) 相对足够大面积辐射亮度定标源  $L_S$ , 辐射亮度响应:

$$R_{OL} = L_S \mathcal{N} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}) \quad (9)$$

(2) 当辐射源足够小,并完全处于仪器的视场内时,相对于辐射强度  $I_S$  和辐射照度  $E_S$  的响应分别为:

$$R_{OI} = I_S \mathcal{N} (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}) \quad (10)$$

$$R_{OE} = I_S / 4\pi r^2 V = E_S \mathcal{N} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}) \quad (11)$$

(3) 将小面积辐射源  $L_S$  放置在仪器入孔前,仪器调焦至无穷远,并满足非充满仪器视场之条件,这时辐射功率响应为:

$$\phi = L_S \cdot A_S \cdot \Omega \quad (12)$$

$$R_{OW} = \phi \mathcal{N} (\text{W} \cdot \text{V}^{-1})$$

式中,  $A_S$  和  $\Omega$  分别是源的面积和仪器的视场角。

### 3 2 辐射定标实验过程

遥感仪器辐射定标的实验过程主要包括三个方面:辐射定标系统配置、定标实验和数据分析处理。

#### 3 2 1 地面遥感仪器的辐射定标

地面遥感仪器大致分为辐射计和照度计两类,辐射计的总视场一般不超过  $15^\circ$ , 对这两类仪器可分别采用标准灯和积分球等定标系统来对其定标。

对应标准灯系统:

$$\text{辐射计: } R_L = \frac{E_S \cdot \theta_s(\theta_p, \theta_v)}{l^2 (V_i - V_{DK})} \quad (13)$$

$$\text{照度计: } R_E = \frac{E_S}{l^2 (V_i - V_{DK})} \quad (14)$$

式中,  $E_s$  和  $\rho_s(\theta_s, \theta_v)$  分别为标准灯照度值和标准板双向反射率;  $l$ ,  $\theta_i$  和  $\theta_v$  分别为标准灯到标准板的距离和入射、观测角;  $V_i$  和  $V_{DK}$  分别为对响应值和暗电流值。

对应积分球系统:

$$\text{辐射计: } R_L = \frac{L_{SP}}{(V_L - V_{DK})} \quad (15)$$

$$\text{照度计: } R_E = \frac{E_{SP}}{(V_E - V_{DK})} \quad (16)$$

式中,  $L_{SP}$  和  $E_{SP}$  分别为积分球系统的输出辐射亮度值和积分球内表面辐照度值。

### 3.2.2 遥感成像仪器的辐射定标

航空或卫星遥感仪器大都是以获取目标光谱图像为主的探测系统, 该类仪器的总视场一般较大, 通常需采用积分球等面辐射源定标。

对于线阵探测器的扫描系统:

$$R_i(\vartheta) = K_i \frac{\int_{\Delta\lambda_i} L_{SP}(\lambda, \vartheta) d\lambda}{V_{Li} - V_{Loi}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

式中,  $\vartheta$ ,  $\Delta\lambda_i$  和  $K_i$  分别为扫描角、光谱带宽和传递系数。

对于面阵探测器系统:

$$R_k(x_p, y_j) = K_k \frac{\int_{\Delta\lambda_k} L_{SP}(x'_i, y'_j, \lambda) d\lambda}{V_{Lk} - V_{Lok}} \quad (18)$$

$$k = 1, 2, \dots, q \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m$$

式中,  $x_p$ ,  $y_j$  和  $K_k$  分别为探测元标号和传递系数。

### 3.3 航空成像光谱仪 MAIS 辐射定标实验

由中国科学院上海技术物理研究所研制的 MAIS 成像光谱仪具有从可见到热红外共 71 个光谱通道, 应用中国科学院安徽光学精密机械研究所辐射定标实验室对其从可见到短波红外波段波长的定标和辐射基本性能检测结果见表 6 线性响应定标结果如图 1 所示。

表 6 MAIS 光谱和辐射定标结果

Table 6 The result of calibration of MAIS

光谱定标 (单色光扫描方式)	
VIS/NIR 定位精度 $\pm 1\text{nm}$	SWIR 定位精度 $\pm 2\text{nm}$
辐射定标 (积分球系统、标准灯系统、杂散光定标系统)	
暗电流	$< 0.004\text{DV}$
稳定度	$< 0.01\text{DV} \quad 60\text{min}$
杂散光	$< 0.01\text{DV}$

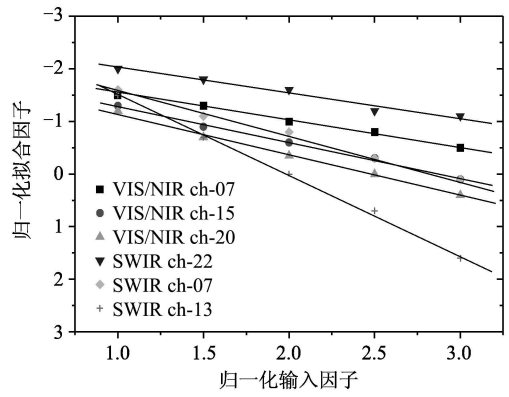


图 1 MAIS 有关通道辐射响应线性度定标结果  
Fig 1 The calibration result of response of MAIS

## 4 卫星传感器星上定标

### 4.1 星上定标面临的问题

光学传感器的星上定标系统主要基于标准灯和太阳作为辐射源。目前常用的标准灯通过反射率已知的漫射板转化为辐亮度对传感器进行定标的方法, 其重要缺陷是光路只能从传感器中间某个部位切入, 不能进行全光路定标。将漫射体置于整个光路的最前方, 采用可展开和收起的机械结构方式可以解决全光路定标的问题, 从而用太阳辐射取代标准灯构成绝对基准已成为发展趋势。

漫射板是用化学材料制成的, 在外太空强烈紫外照射下, 漫射板材料会发生分解, 航天器的排出物也会污染漫射板的表面, 这些因素都会引起反射率的变化, 带来辐射定标的误差。这种误差是辐射源定标方法本身无法消除的。有鉴于此, 中国科学院安徽光学精密机械研究所正在研制如图 2 所示的星上定标系统。这种方案借鉴了可收放式漫射板能够全光路定标的优点, 采用日光作为辐射源, 但不以它们作为绝对标准, 绝对标准由星上标准辐亮度计提供。这种

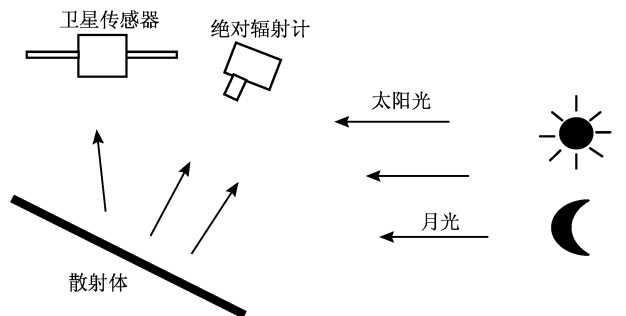


图 2 基于探测器的星上定标方案

Fig 2 The in flight calibration solution based detector

星上定标方案解决了漫射板反射率变化的难题。

### 4.2 改进的星上定标方法

目前, 中国科学院上海技术物理所和安徽光机所正共同研制 FY-3 气象卫星中分辨率成像光谱仪星上定标系统, 该系统主要由积分球和标准探测器等组成。积分球系统将光锥引入的太阳光以及内置光源的光辐射转化为朗伯体光源, 提供满足全孔径和全视场星上定标要求的均匀面光源, 而标准探测器的功能则是监测定标光源的稳定性和测量定标光束的绝对辐亮度, 实现绝对辐射定标。预期该探测器能够达到 2% 的绝对不确定度。

系统中的标准探测器, 其核心是由三片硅光电二极管构成的陷阱式光辐射探测器, 在入瞳处安装干涉滤光片。陷阱探测器的工作原理如图 3 所示。

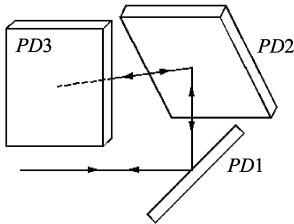


图 3 陷阱探测器的工作原理

Fig 3 The work principle of trap detector

入射光在陷阱探测器的 3 个光敏面上依次经历 5 次反射后沿原路返回, 通过这种原理达到提高精度的目的: (1) 总反射率大为降低, 约为单个硅管反射率的 1%, 光敏面反射损失所引起的测量不确定度随之大大降低; (2) 第一、二个硅管的入射面相互垂直, 入射角相等, 第三个硅管正入射, 从而保证了探测器对入射光的偏振状态是非敏感的; (3) 多次反射提高了光电转换效率和灵敏度。

陷阱探测器本身是辐射功率的标准探测器。为实现辐亮度测量, 需要限定标准探测器的视场和接收孔径角, 这是通过光阑来实现的, 如图 4 所示。在陷阱探测器之前分别安装孔径光阑限制入射立体角, 安装视场光阑以限制有效视场。

根据图 4 所示的原理, 探测器的输出电压是:

$$U = \int_{\Delta\lambda} \Phi(\lambda) R_{\Phi}(\lambda) d\lambda = \int_{\Delta\lambda} L(\lambda) A \Omega \cdot t(\lambda) \cdot R_{\Phi}(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

式中,  $\Phi(\lambda)$  是探测器实际接收到的光谱辐射功率 ( $W \cdot nm^{-1}$ ),  $R_{\Phi}$  是陷阱探测器的功率响应率

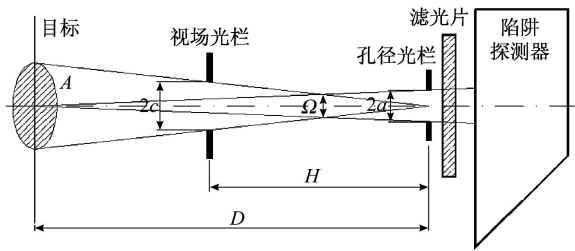


图 4 标准探测器的原理示意图

Fig 4 The principle scheme of standard detector

( $V \cdot W^{-1}$ ),  $L(\lambda)$  是入射光谱辐亮度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$ ),  $A$  是探测器的视场面积 ( $m^2$ ),  $\Omega$  是接收立体角 (sr),  $t(\lambda)$  是滤光片的光谱透过率,  $\Delta\lambda$  是由滤光片确定的光谱带宽 (nm)。

定义通道内的等效光谱辐亮度为:

$$L^e(\Delta\lambda) = \frac{\int_{\Delta\lambda} L(\lambda) A \Omega \cdot t(\lambda) \cdot R_{\Phi}(\lambda) d\lambda}{A \Omega \int_{\Delta\lambda} t(\lambda) \cdot R_{\Phi}(\lambda) d\lambda} = \frac{U}{A \Omega \int_{\Delta\lambda} t(\lambda) \cdot R_{\Phi}(\lambda) d\lambda} \quad (20)$$

根据图 4 所示的几何关系, 视场面积  $A = \pi (D \tan \theta_v)^2 = \pi (Dc/H)^2$ , 接收立体角  $\Omega = \pi a^2/D^2$ , 因而几何量因子

$$A \Omega = (\pi ac/H)^2 \quad (21)$$

式中,  $a, c, H$  分别是孔径光阑半径、视场光阑半径和这两个光阑之间的距离。结合 (4b)、(4c) 式, 可以得到通道内等效光谱辐亮度的测量方程为

$$L^e(\Delta\lambda) = \frac{U}{\int_{\Delta\lambda} t(\lambda) \cdot R_{\Phi}(\lambda) d\lambda} \cdot \left( \frac{H}{\pi ac} \right)^2 \quad (22)$$

(22) 式等号右边所有量都是可以直接测量的, 这意味着可以通过测量探测器的输出电压、探测器的响应率、滤光片的透过率和光阑几何量来获得绝对光谱辐亮度  $L^e$ , 并由此实现对卫星传感器的绝对定标。

## 5 卫星传感器场地辐射校正

目前卫星传感器的场地辐射校正常用所谓“反射率基法”、“辐亮度基法”和“辐照度基法”<sup>[7]</sup>。方法所依赖的传递标准或参照标准的精度是可控的, 可以应用基于低温绝对辐射计的高精度标准对参照板的 BRDF 特性进行完备的测量, 并使测量仪器有足够高的稳定性和与卫星传感器的相似性, 由此, “反射率基法”精度的提高基本只依赖于大气模式参数的确定;

“辐射亮度基法”的精度则仅取决于同步实验过程。

## 5 1 1999年敦煌校正场陆地卫星同步实验

### 5 1 1 同步实验区域及参照

同步观测区采用 1999 年重新选定的“中心区”，“中心区”面积为  $500\text{m} \times 500\text{m}$ ，中心坐标北纬  $40^{\circ}05'28''$ ，东经  $94^{\circ}23'37''$ ，海拔高度 1303m。陆地卫星同步观测区地面色调为灰色，表面沙石比例约 3:7，整个区域平均反射比为 22% 左右。在实验区西边界外 10m 处，沿南北方向人工压制了一条 15m 宽 500m 长的参照带，该参照带平均反射比近 27%。

### 5 1 2 同步实验数据获取

应用反射辐照度方法来获得大气透过及气溶胶参数。测量装置主要包括 ASD-VIS-NIR 光谱辐射计， $400\text{mm} \times 400\text{mm}$  标准参考板，旋转支架，挡光板。同步观测区反射辐射主要以观测变化和一定区域重点观测为主，在确定的卫星过顶时段（前后 10min 内），要以卫星传感器的观测几何条件来控制数据的获取。实验仪器设备主要是 ASD-FR 光谱辐射计和参考板。在同步实验数据获取的同时，以 R981 光谱照度计监测同步实验过程中的照度变化，用于结果修正，并进行实时的气压、相对湿度、能见度、温度、风力和风向等观测。

## 5 2 同步实验过程

1999 年 7 月 11 日，Landsat 5 定轨运行敦煌校正场区域过顶，1999 年 7 月 2 日向 SPOT 图像公司中国代理申请并得到了 7 月 11 日观测敦煌的变轨计划，1999 年 7 月 11 日两颗卫星过顶参数见表 7。

表 7 1999 年 7 月 11 日 Landsat 5 和 SPOT 4 轨道参数表  
Table 7 The track parameter of Landsat 5 and SPOT 4 at July 11, 1999

卫星	Landsat 5	SPOT 4
观测角	小于 $5^{\circ}$	$22^{\circ}38'$
观测方位	—	由西向东
过顶时间(北京时间)	11 时 48 分	12 时 54 分
预接收波段	4 波段	3 波段 + 全色波段

同步观测实验从早 6 时 45 分开始，11 时 30 分左右天顶积云，同步实验不得不终止，稍后即确认 Landsat 5 和 SPOT 卫星传感器均没有开机。

## 5 3 模拟处理结果及分析

本文仍依据 1999 年 7 月 11 日 11 时 30 分前实

验所获得的数据，对 TM 的 5 个通道和 SPOT 的 4 个通道分别采用了两种输入参数（气象观测的水平能见度及  $555\text{nm}$  的气溶胶光学厚度），并分别在大陆型和沙漠型两种大气气溶胶模式下，计算出由敦煌校正场地面反映在卫星高度的辐射亮度。计算和对比结果如图 5 所示。

敦煌辐射校正场地处中国西部内陆，属半干旱沙漠气候，在还没有足够数据来确定和验证该地区更接近那种大气气溶胶类型的前提下，按大陆型或沙漠型气溶胶类型的设定来计算均不会产生过大的误差。从图 5 中可以看出，无论采用哪种输入参数，虽然得到的总辐射量的较为一致，但两种模型在大气、背景及目标辐射的分项计算中的误差还是明显的。

(1) 分别以能见度 40km 和气溶胶光学厚度 0.1183（相当于能见度 51km）输入下，计算得到的各个波段的总辐射量误差均小于 1%，说明在敦煌地区较晴朗天气条件下，总辐射量对大气模式等的依赖性不强；

(2) 对短波波段，如 TM 1、TM 2、SPOT1(XS1)、SPOT2(XS2)以及 SPOT4(PAN)波段，两种输入参数和两种模式下的计算结果显示三部分相对误差不大，基本不超过 3%；

(3) 对于 TM 5 和 TM 7 波段，由于模式及输入均较大地改变了三部分的比例，并直接影响到目标辐射分量的变化，对应能见度输入的相对误差已超过 5%，对应实测光学厚度的输入可以使相对误差有所降低，但也在 3% 左右。对 SPOT3(XS3)波段，相对误差也在 4% 左右。

## 6 结果与讨论

实验室辐射定标的精度取决于辐射定标系统的精度和辐射定标方法。标准灯辐射定标系统受到标准灯、电源系统、几何条件和标准板性能等诸多环节的影响，由于误差来源多而使得精度难以提高；积分球辐射定标系统的精度关键在于积分球辐射源辐射量值的获得精度，基于低温绝对辐射计传递的硅光二极管陷阱标准器的预定标系统，是提高积分球辐射定标系统精度的一个有效途径。

在星上定标中，由于基于标准灯技术的简单而常被采用，然而由于该方法中的定标光路只能从传感器中间部位切入，不能完全模仿成像条件，从而限制了定标精度的进一步提高。正在发展的基于漫射体和标准辐射计的方法，可以消除目前标准灯的缺陷，实现全光

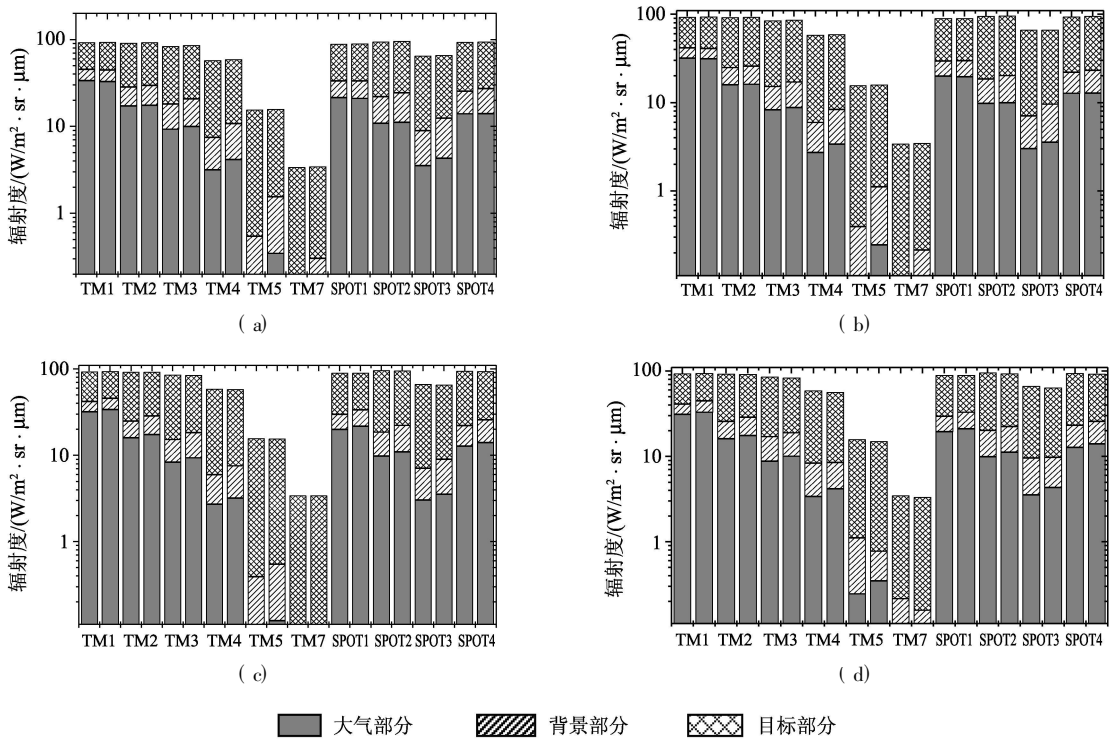


图 5 1999 年 7 月 11 日, 基于在中国遥感卫星敦煌辐射校正场的同步实验观测数据, 并分别按大陆型和沙漠型气溶胶模型, 利用 6S 模式模拟计算达到 TM 和 SPOT 传感器处的辐射亮度值。输入水平能见度为 40km, 气溶胶光学厚度为 0.1183(550nm)。

(a) 输入水平能见度, 大陆-沙漠气溶胶模型; (b) 输入气溶胶光学厚度, 大陆-沙漠气溶胶模型;  
 (c) 能见度-气溶胶光学厚度, 大陆气溶胶模型; (d) 能见度-气溶胶光学厚度, 沙漠气溶胶模型

Fig 5 The radiance at satellite level is simulation calculated by 6S code. The result that is used the synchronization experiments( July 11 1999) and continental /desert aerosol model respectively based CRCS Dunhuang test site. visibility is 40km and aerosol optical depth is 0.1183 at 550nm

(a) visibility for continental /desert aerosol model; (b) aerosol opt. depth for continental /desert aerosol model;  
 (c) visibility /aerosol opt. depth for continental aerosol model; (d) visibility /aerosol opt. depth for desert aerosol model

路和全孔径定标, 由于定标方法更接近传感器成像条件, 从而具有提高星上传感器定标精度的美好前景。

场地辐射校正, 无论是“反射率基法”、“辐亮度基法”还是“辐照度基法”, 其误差主要来源于两个过程: 校正场地表面光学参量与大气光学参量的测量误差; 大气辐射传输模式的计算误差。测量误差可以通过对测量仪器的精确定标、对参考板进行野外 BRDF 修正及对测量过程的规范化等措施来控制; 大气辐射传输计算精度的提高, 则取决于辐射传输模式的正确确定及其相关输入参数的精度。

参考文献 (References)

[ 1 ] Gentile T R, Houston J M, Houston C L. Realization of Scale of Absolute Optical Response Using the NIST HACR[ J ]. *Applied Optics* 1996 35( 4 ): 4392- 4403  
 [ 2 ] Gentile T R, Houston J M, Harlis J E, et al. National Institute of Standards and Technology high accuracy cryogenic radiometer

[ J ]. *Applied Optics* 1996 35( 3 ): 1056- 1068  
 [ 3 ] Wu H Y, Wang G Y, Xun Y L. Calibration Study of Trap Radiation of Si Photodiode[ J ]. *Journal of Applied Optics* 1998 19( 2 ): 1- 4. [ 吴浩宇, 王光远, 荀毓龙. 硅光二极管陷阱辐射定标研究[ J ]. *应用光学*, 1998 19( 2 ): 1- 4 ]  
 [ 4 ] Slater P N, Biggar S F, Hohn R G, et al. Reflectance and Radiance based Methods for the In flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors[ J ]. *Remote Sensing of Environment* 1987 22: 11- 37  
 [ 5 ] Gu X F, Steven M D, Clark J A, et al. Evaluation of Measurement Errors in Ground Surface Reflectance for Satellite Calibration[ J ]. *International Journal of Remote Sensing* 1992 13: 2531- 2546.  
 [ 6 ] Qiao Y L, Wu H Y, et al. The Radiometric Calibration System and Application in Remote Sensing[ A ]. Xun Y L. The foundation and application of remote sensing[ C ]. Beijing: CST Publish, 1991. [ 乔延利, 吴浩宇等. 辐射定标研究及辐射定标实验室建立[ A ]. 荀毓龙. 遥感基础试验与应用[ C ]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.  
 [ 7 ] Biggar S F. In Flight Methods for Satellite Sensor Absolute Radiometric Calibration[ D ]. The University of Arizona 1990