

doi:10.3788/gzxb20174609.0912005

星上定标漫射板远紫外 BRDF 测量方法

韩官^{1,2}, 林冠宇¹, 李博¹, 汪龙祺¹, 曹佃生¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对星载漫射板远紫外波段(140~240 nm)的双向反射分布函数测量过程中,探测器响应线性问题和紫外光源稳定性差的问题,提出一种采用光源监测比例补偿的相对测量方法.根据测量方法设计了一种基于六自由度转台结构形式的测量系统,该系统采用漫射板二维平移+二维转动、探测器二维转动的组合运动形式,可实现漫射板半球空间内任意点、任意方位的双向反射分布函数测量.用所提方法进行测量实验,并对影响系统测量结果的主要因素进行了不确定度分析,结果表明总测量不确定度约为 5.5%.

关键词:星上定标;漫射板;远紫外;双向反射分布函数;误差分析

中图分类号:O432;TB303

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0912005-8

Measurement of Far-ultraviolet BRDF for Solar Diffuser

HAN Guan^{1,2}, LIN Guan-yu¹, WANG Long-qi¹, LI Bo¹, CAO Dian-sheng¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problems of the linear response of the detector and the poor stability of the UV light source in the process of bidirectional reflectance distribution function bidirectional reflectance distribution function measurement of the far ultraviolet spectrum (140~240 nm) for solar diffuser, a relative method of measurement using the light source monitoring proportional compensation was proposed. According to the method, a system based on the structure of six-degree-free turntable was designed. The system can measure the bidirectional reflectance distribution function of the solar diffuser at any point and any position in the hemisphere space by controlling the diffuser with two-dimensional translation and rotation and the detector with two-dimensional rotation. The measurement experiment was carried out by using the proposed method, and the main factors that affect the measurement results of the system were analyzed. The total uncertainty of measurement is about 5.5%.

Key words: On-board calibration; Diffuser; Far ultraviolet; Bidirectional reflectance distribution function; Error analysis

OCIS Codes: 120.5240; 290.1483; 290.5820; 230.1980;

0 引言

星上定标作为地球观测卫星探测器的一种优先选用的辐射定标方式,可以通过太阳-漫射板方便地完成,利用这种定标方式可以实现探测器在真空紫外到近红外波段全孔径、全视场、高准确度的在轨辐射定

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制(No.D41527806)资助

第一作者:韩官(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为真空紫外 BRDF 测量仪器设计. Email:hanguan1992@163.com

导师:林冠宇(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为紫外光学遥感仪器. Email:linguan1976@163.com

通讯作者:汪龙祺(1978-),男,副研究员,博士,主要研究方向为紫外光学遥感仪器. Email:fygoal@aliyun.com

收稿日期:2017-02-22;录用日期:2017-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

标^[1-3].探测器利用太阳-漫射板定标的过程是通过已知的大气外太阳辐照度和漫射板的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)值确立探测器辐亮度标准的过程^[4],这一过程中漫射板作为传输标准,其 BRDF 准确度是实现探测器高准确度定标的关键.

对于漫射板 BRDF 的测量主要集中在可见和红外波段,主要有两种定标方法^[5].一种是绝对测量方法,根据 BRDF 的定义,直接测量光源入射和样品漫射板反射的辐照度或辐亮度以及相应的几何因子,通过计算得到样品漫射板的 BRDF 值^[6-7].这种测量方法在可见、红外波段的 BRDF 测量中应用广泛,对于可见光,国内外均可达到不确定度 1.0% 以内的测量水平^[8-9],但是测量准确度受探测器定标准确度影响,并且存在探测器响应线性问题.第二种方法是相对测量方法,采用同一测量系统分别对标准漫射板和待测板进行反射辐照度或辐亮度测量,通过其比值与标准漫射板的 BRDF 值相乘获得待测板 BRDF 值,这种测量方法避免了探测器定标误差和线性响应问题,对可见光的 BRDF 测量重复性不大于 1.5%^[10],但是测量准确度受标准板的 BRDF 定标准确度影响较大.

相对于可见光与红外探测,紫外探测技术由于空间背景干扰小、对热不敏感等许多独有的特点在空间天文、行星和卫星探测以及地球表面和大气探测等方面得到越来越广泛的应用,而传统的 BRDF 测量技术并不能实现远紫外波段 BRDF 的高准确度测量,为满足紫外探测星上定标需求,本文针对远紫外 BRDF 测量进行了研究.

1 BRDF 测量原理

1.1 BRDF 定义

BRDF 是表征物体表面反射特性的一个物理量.如图 1 所示,物体的 BRDF 用照射到物体表面的光的反射辐亮度与入射辐照度的比值来表示,即

$$f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{dL_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{dE(\varphi_i, \theta_i; \lambda)} \quad (1)$$

式中 φ, θ 分别为方位角和天顶角,下标 i, r 分别代表入射和反射, λ 表示波长, BRDF 是一个关于四个角度并具有波长依赖性的函数.

1.2 测量原理

BRDF 绝对测量需要分别测量漫射板入射信号、反射信号以及相关几何因子,然后计算获得 BRDF.测量时,照射到样品表面的入射光必须是均匀的、准直的、单色的光束,首先将样品移开光路测量入射光信号,然后移入样品测量反射光信号.

根据绝对测量方法,测量的 BRDF 结果 $f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)$ 可以表示为

$$f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{S_i(\lambda)} \cdot \frac{R_i(\lambda)}{R_r(\lambda)} \cdot \frac{D^2}{A_r \cdot \cos \theta_r} \quad (2)$$

式中 $S_i(\lambda)$ 和 $S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)$ 分别为探测器测量的入射和反射辐照度信号, $R_i(\lambda)$ 和 $R_r(\lambda)$ 分别为探测器对入射和反射辐通量的响应, D 为探测器到探测发光点之间的距离, A_r 为探测器光阑孔径面积, θ_r 为探测天顶角,是探测器探测方向与样品表面法线之间的夹角.

如果接收端探测器可以提供一个大动态范围完美的线性输出,即 $R_i(\lambda) = R_r(\lambda)$, 则 BRDF 值将可以通过式(3)进行精确地标定,即

$$f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{S_i(\lambda)} \cdot \frac{D^2}{A_r \cdot \cos \theta_r} \quad (3)$$

式(3)这种绝对测量方法在可见、红外波段的 BRDF 测量中应用广泛.但对于真空紫外波段而言,首先,很难获得稳定性足够好的紫外光源,在入射信号和反射信号的两次测量过程中会因为光源漂移而造成大的测量误差;其次,漫射板入射信号与反射信号大小往往相差 4 个数量级以上,真空紫外波谱反射率低,会造成更大的差异,对于真空紫外探测器而言,很难实现探测器高准确度的线性响应^[12].因此,式(3)的绝对测量方

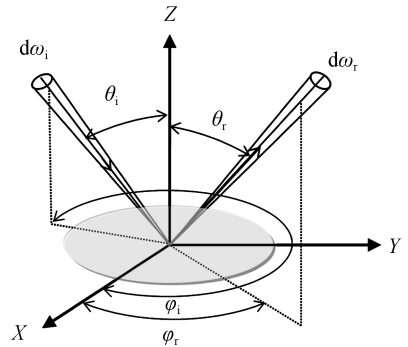


图 1 BRDF 测量几何关系

Fig.1 Geometry of BRDF measurement

法无法实现漫射板远紫外波段的 BRDF 高精度测量。

如果采用式(2)的测量方法,采用同一测量系统测量一个 BRDF 值已知的标准散射样品,则可得

$$f_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{S_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{S_i'(\lambda)} \cdot \frac{R_i'(\lambda)}{R_r'(\lambda)} \cdot \frac{D^2}{A_r \cdot \cos \theta_r} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)可得

$$\frac{f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{f_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)} = \frac{S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{S_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)} \cdot \frac{S_i'(\lambda)}{S_i(\lambda)} \cdot \frac{R_i(\lambda)}{R_i'(\lambda)} \cdot \frac{R_r'(\lambda)}{R_r(\lambda)} \quad (5)$$

当信号相差一个数量级以内时,探测器可以达到不确定度 0.3% 以内的线性响应^[13],假设两次测量时光源改变不大,则两次测量时反射信号相差不大,探测器线性响应,即 $R_r'(\lambda) \approx R_r(\lambda)$ 。两次测量过程中,入射光束信号因光源不稳定而产生的变化量可以表示为

$$\gamma = \frac{\phi_i'}{\phi_i} = \frac{S_i'(\lambda)/R_i'(\lambda)}{S_i(\lambda)/R_i(\lambda)} \quad (6)$$

式中 ϕ_i 和 ϕ_i' 分别为两次测量时的入射光通量。

标准散射样品的 BRDF 值可以从国家计量院获得,也可以通过测量具有朗伯散射特性的标准样品的半球反射率 ρ 间接获得,其 BRDF 值为

$$f_r' = f_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{\rho}{\pi} \text{sr}^{-1} \quad (7)$$

则式(5)变为

$$f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{S_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)} \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \gamma \quad (8)$$

通常的 BRDF 相对测量都是默认光源为稳定的,即 $\gamma = 1$ 。但是对于真空环境下远紫外波段的 BRDF 测量,紫外光源稳定性差,光学系统在真空紫外环境下性能容易衰变,对于标准样品和待测样品的两次测量,时间间隔一般大于 10 min,如果忽略光源变化,这将导致严重的测量误差。

为消除光源随时间漂移对测量准确度的影响,提出光源监测比例补偿的方案,通过设置参考光路测得光源变化量。光源监测比例补偿方法是将入射光束在照射到样品表面之前分成两路,仍然照射到样品表面的一路称为主光路,另一路为参考光路,测量时,主光路与参考光路探测器同时采集信号,因为主光路与参考光路能量配比为定值,所以参考光路两次测量的信号比值即为光源变化量,也即入射到样品表面的入射光变化量 γ 。

通过参考光路测得的入射光变化量 γ 可以表示为

$$\gamma = \frac{\phi_i'}{\phi_i} = \frac{\phi_r'}{\phi_r} = \frac{V_1 - V_{10}}{V_2 - V_{20}} \quad (9)$$

式中 V_1 和 V_2 分别为参考光路测得的标准样品和待测样品入射信号, V_{10} 和 V_{20} 分别为两次测量时系统暗噪声信号。

通过式(8)和(9)可以得到采用光源监测比例补偿方法测得的样品漫射板 BRDF 值为

$$f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = \frac{S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{S_r'(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)} \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{V_1 - V_{10}}{V_2 - V_{20}} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,如果知道标准样品的半球反射率,用同一测量系统对标准样品和待测样品进行两次测量就可以计算出待测样品的 BRDF 值。采用这种测量方法不仅避免了测量过程中照射面积、探测器距离等几何参量的测量,极大地降低了对机械结构的准确度要求,并且通过光源监测补偿方法极大地降低了光源稳定性带来的测量误差,但是这种测量方法对标准样品质量和反射率测量准确度要求极高,本实验室采用物理磨砂+化学磨砂方法研制的铝基漫反射板以及通过半球反射镜对漫反射板真空紫外半球反射率的测量已可以基本满足 BRDF 相对测量要求。

2 测量系统设计

根据式(10)采用光源监测比例补偿的相对测量方法进行漫射板远紫外 BRDF 的测量,设计了一种基于

六自由度转台结构形式的具有光源监测模块的测量系统方案.测量系统主要由光学系统、机械系统和电控系统等组成.

2.1 光学系统

光学系统主要由光源、准直系统、参考光路和主光路接收系统组成,其结构原理如图 2 所示.光源发出的光经过狭缝进入准直系统,经过准直后变成平行光束进入参考光路,参考光路通过分光调制扇对光束进行分光,一路为参考光路,参考光路探测器测得的参考光路信号作为光源监测信号,一路为主光路,主光路照射到测量样品表面,主光路接收系统探测器接收样品漫反射的光信号.

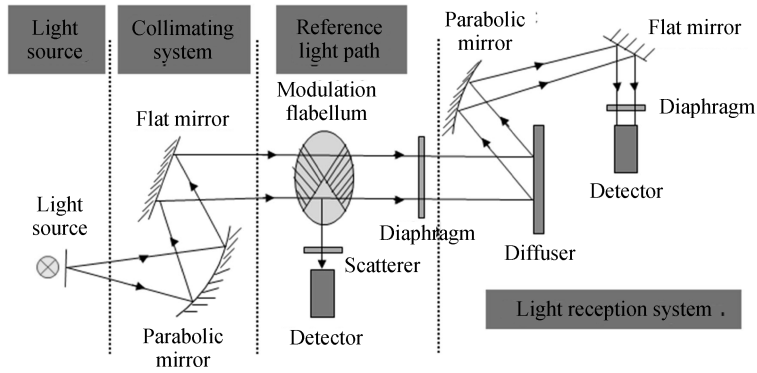


图 2 光学系统结构原理图

Fig.2 Schematic diagram of the structure of optical system

为提高远紫外波段光谱的传输效率,准直光路和主接收光路均采用平面镜+凹面镜组合的反射结构,并采取表面镀 Al+MgF₂ 膜层的方式来提高反射率.参考光路采用半反半透的调制扇作为分光元件,调制扇采用直流无刷电机带动,为保证参考光路的稳定性,调制扇采用铝制基底并采取镀镍处理来避免在真空紫外环境中的性能衰变,参考光路探测器前加锁相放大器对微弱的高频调制信号进行低频噪声抑制.

2.2 机械系统

测量系统采用入射光学系统位置不变、漫射板和探测器方位变化的形式组合运动形式,入射点和入射角度以及探测角度由六自由度的样品-探测器转台控制.样品-探测器转台由两个旋转台、两个平移台、一个探测器转臂和一个样品转动机构组成,转台共有四个旋转自由度和两个平移自由度,整体结构如图 3 所示.

按图 3 所示分别建立基坐标系 $X_0Y_0Z_0$ 、样品坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 、样品转台坐标系 $X_2Y_2Z_2$ 、探测器转台坐标系 $X_3Y_3Z_3$ 和转臂坐标系 $X_4Y_4Z_4$.初始状态时所有坐标系 Z 轴同向, XOY 面处于同一平面内, O_0 与 O_1 点重合,如图 4 所示,设此时、样品探测点为 $(0,0)$ 点,入射方位角、天顶角以及探测方位角、天顶角均为 0° .

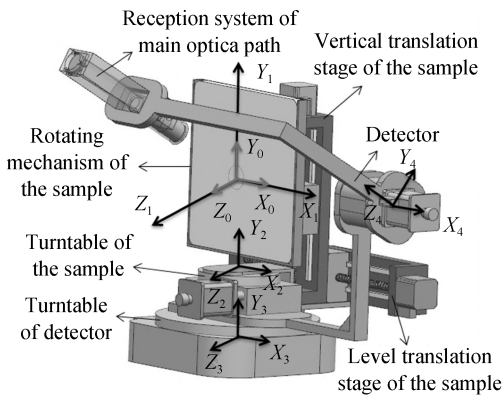


图 3 样品-探测器转台结构示意图

Fig.3 Structural representation of the turntable of sample and detector

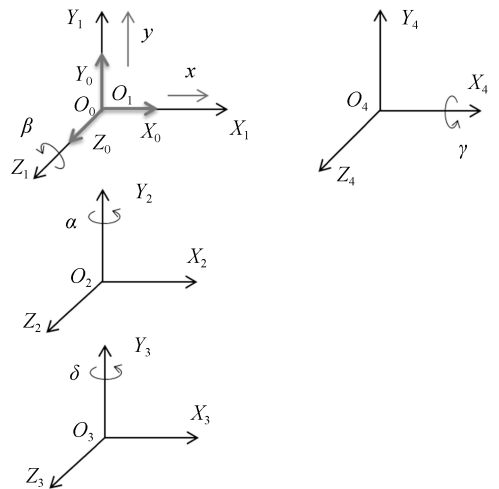


图 4 初始状态坐标系

Fig.4 Original coordinate system

设测量样品沿 X_1 方向平移量为 x ,沿 Y_1 方向平移量为 y ,沿两个方向的平移可以实现对样品任意点的

测量.设样品转台绕 Y_2 轴的旋转角度为 α ,样品绕 Z_1 轴自旋转角度为 β ,探测转臂绕 X_4 轴旋转角度为 γ ,探测器转台绕 Y_3 轴旋转角度为 δ ,则此时测量系统入射天顶角 $\theta_i = \alpha$,入射方位角 $\varphi_i = \beta$,探测天顶角 $\theta_r = \gamma$,探测方位角 $\varphi_r = \delta - \gamma$,即

$$f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) = f_r(\beta, \alpha; \delta - \gamma, \gamma; \lambda) \quad (11)$$

通过该样品-探测器转台六个自由度的变化配合,可以实现待测样品半球空间内任意点、任意方位的 BRDF 测量,并且该结构不需要复杂的坐标变换,结构紧凑,控制简单,运动准确度高.

3 实验分析

测量实验采用氙灯作为紫外光源,采用滨松光子 R7639 光电倍增管作为光电探测器,分别采用 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 和 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的铝基漫反射板作为标准样品和待测样品.测量前先进行系统暗噪声测量,待系统环境真空度达到 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 、温度 25°C 时,探测器加高压,待信号稳定后,参考光路和主接收光路探测器同时采集系统暗噪声信号.进行样品 BRDF 测量时,先在样品位置放置标准样品,参考光路和主接收光路探测器同时采集信号;将标准样品移出光路,待测样品进入测量位置,然后进行待测样品信号测量.采用逐点测量法,探测器每个位置点采集信号 21 次,采集信号减暗噪声信号后取平均值作为单点测量信号值.经过两次测量,根据式(10)计算获得待测样品不同方位角度下的 BRDF 值.

当入射光垂直入射时,对垂直漫反射板方向 60° 锥角的空间进行 BRDF 测量.探测方位角范围 $-90^\circ \sim 90^\circ$,探测间隔 30° ,探测天顶角范围 $-60^\circ \sim 60^\circ$,探测间隔 10° ,当探测天顶角在 0° 附近时,探测器遮挡入射光形成无效探测点,遮挡角度范围为 $\pm 5.5^\circ$,一个测量循环得到 72 个有效测量点,对 180 nm 波段的 BRDF 测量结果如图 5 所示.图 5 三维模型图为一中间高边缘低的伞状形式,其 0° 方位角的剖面图如图 6 所示,理想漫射板 BRDF 值应为水平直线,实际测量中,由于测试样品散射特性不够理想,BRDF 值随天顶角增大而减小, 60° 天顶角处 BRDF 值比 10° 处衰减 18.86% ,这与漫射板方向反射率 $15\% \sim 20\%$ 的衰减趋势一致.在相同天顶角处,BRDF 理论值应在任意方位角相等,实验测量值随方位角变化优于 0.98% ,说明测量系统具有较高重复性.

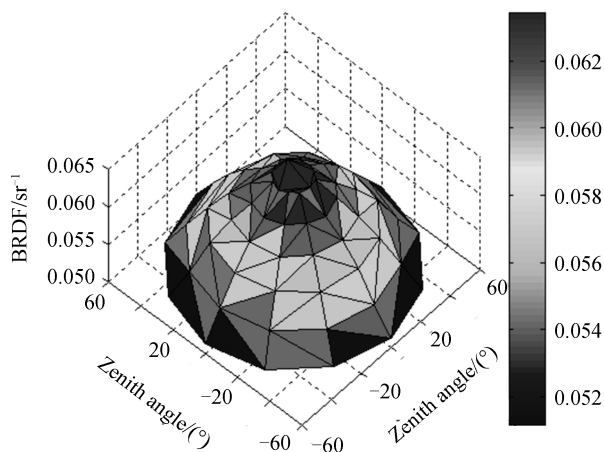


图 5 垂直入射样品 BRDF 值(180 nm)
Fig.5 BRDF of sample at 0° incidence(180 nm)

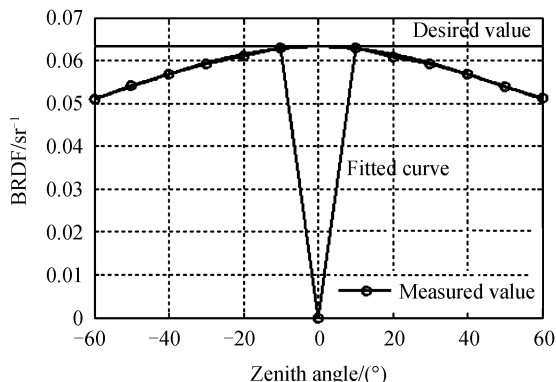


图 6 零度方位角 BRDF 值(180 nm)
Fig.6 BRDF at 0° of azimuth angle (180 nm)

4 测量不确定度分析

一般来说,漫射板 BRDF 测量误差主要来源于光源、探测器和转动部分三方面^[1].对于本文采用的基于光源监测比例补偿的相对测量方法,极大地减小了光源和探测器方面带来的测量误差,根据测量方法和测量方案,影响测量结果的因素主要有标准样品的散射特性、半球反射率测试准确度、探测器线性、杂散光以及转台准确度等,系统测量不确定度表示为

$$\Delta_{\text{BRDF}} = \sqrt{\sum (\Delta_i)^2} \quad (12)$$

式中, Δ_i 为各影响因素带来的误差大小.

4.1 标准样品散射特性

对于标准样品的朗伯余弦辐射特性可以通过光束正入射时测量样品各散射方向的光强分布来检测,采用图7所示装置测量样品散射特性的不确定度可以表示为^[14]

$$\frac{\Delta V_{\theta}}{V_{\theta}} = \sqrt{\left| \frac{\Delta R}{R} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I_{\theta}}{I_{\theta}} \right|^2} \quad (13)$$

式中 Δ 表示误差, R 为探测器响应度, I_{θ} 为方向 θ 的光强。

通过对作为标准样品的铝基漫反射板进行光强分布检测,其在紫外波段朗伯散射特性不确定度约为3.37%。

4.2 半球反射率测量

通过如图8所示的半球反射镜装置对标准样品半球反射率进行测量,测量时,首先让入射光束直接照射到探测器,测量入射光束信号 $S_i(\lambda)$; 然后让光束照射到样品表面,测量反射信号 $S_r(\lambda)$, 测量结果如式(14)所示,式中 A_0 为半球反射镜半球面积, A 为入射光开口面积, ρ' 为已知的半球反射镜反射率。

$$\rho = \frac{S_r(\lambda)}{S_i(\lambda)} \cdot \frac{A_0}{A_0 - A} \cdot \frac{1}{\rho'} \quad (14)$$

样品均匀性可以通过测量不同区域样品的半球反射率来评价,其均匀性可表示^[14]为

$$J(\lambda) = 1 - \sqrt{\frac{\sum (\rho_i(0, d, \lambda) - \overline{\rho(0, d, \lambda)})^2}{n(n-1)}} \bigg/ \overline{\rho(0, d, \lambda)} \quad (15)$$

式中 n 为测量区域的个数, i 为测量区域标号, $i \in [1, n]$, $\rho_i(0, d, \lambda)$ 为波长为 λ 时区域 i 处的半球反射率, $\overline{\rho(0, d, \lambda)}$ 为波长为 λ 时各区域半球反射率的平均值。

通过对标准反射样品的半球反射率测试,其均匀性优于0.96,半球反射率测量不确定度约为3.74%。

4.3 机械系统

采用相对测量方法避免了测量系统几何因子的测量,机械系统造成的测量不确定度主要是由于角度定位误差引起的。因为测量样品散射特性和均匀性不够理想,不同角度反射特性是不一样的。一般来说,入射光方向不变时,随着测量天顶角度的增加,BRDF值逐渐减小。机械误差 Δ_J 可以表示为式(16),式中 $\Delta\theta$ 为角度误差, f_{θ} 为反射角 θ 方向的BRDF值。

$$\Delta_J = \frac{|f_{\theta+\Delta\theta} - f_{\theta-\Delta\theta}|}{2f_{\theta}} \quad (16)$$

样品-探测器转台转动准确度为 $\pm 0.1^\circ$, 通过对漫射板样品BRDF二维特性的分析^[15], 机械误差影响约为0.3%。

4.4 杂散光

为减小杂散光对测量结果的影响,在准直系统进光口和出光口分别设置遮光罩和口径光阑,在主光路接收系统前设置消杂光光阑,除反射镜外所有零部件均作表面染黑处理,吸光率在95%以上。通过软件TracePro对系统模型进行杂散光分析,分析结果表明系统杂散光影响约为2.07%。

综上所述,参考相似的BRDF测量系统中的误差来源以及本测量方法的特点,对测量系统各方面的不确定度影响因素如表1所示,实际测量中受温度、震动等影响可能会使实际不确定度大于理论值。

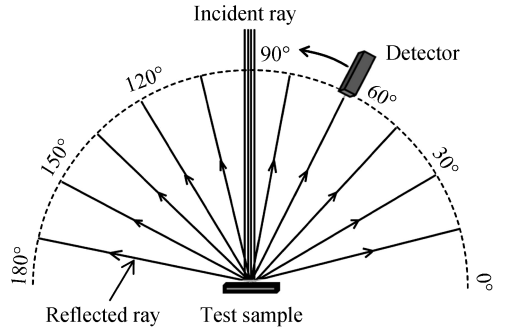


图7 散射特性测试原理示意图

Fig.7 Schematic diagram of the test of scattering properties

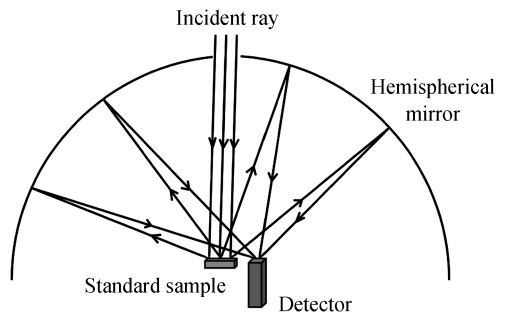


图8 半球反射率测试原理图

Fig.8 Schematic diagram of the test of hemisphere reflectivity

表 1 测量系统不确定度
Table 1 The uncertainty of measurement system

Parameter	Value/%
Scattering characteristics of standard sample	3.37
Hemisphere reflectivity	3.74
Stability of light	0.50
Repetitive of wavelength	0.50
Linearity of detector	0.30
Stray light	2.07
Accuracy of turntable	0.30
Combined uncertainty	5.51

从测量系统不确定度分析可以看出,采用光源监测比例补偿的相对测量方法进行 BRDF 测量的最大误差来源于标准样品方面.随着真空紫外波段反射样品研制技术和半球反射率标定技术的发展,采用这种方法的 BRDF 测量准确度将得到不断提高.

5 结论

本文通过理论分析发现传统的 BRDF 测量方法在进行漫射板远紫外波段 BRDF 测量过程中会因为探测器响应线性问题和紫外光源稳定性差等问题而造成严重的测量误差.因此提出了一种采用光源监测比例补偿的 BRDF 相对测量方法,并根据测量方法设计了一种基于六自由度转台结构形式的机械系统运动模型,该模型结构紧凑,控制简单,可实现半球空间内任意点、任意角度的高准确度定位.通过对测量系统的不确定度分析发现该测量方法测量准确度主要受标准样品质量、半球反射率定标准确度和杂散光影响,不确定度约为 5.5%,研制高质量的真空紫外反射样品和提高样品半球反射率定标准确度是提高此种方法 BRDF 测量准确度的关键.

参考文献

- [1] CHEN Hong-yao, ZHANG Li-ming, SHI Jia-ding, *et al.* High accuracy gonireflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 72-80.
陈洪耀,张黎明,施家定,等. 高准确度星上定标漫射板双向反射分布函数绝对测量系统研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, **9**(1):72-80.
- [2] ZHAO Yan-hua, DONG Jian-ting, ZHANG Xiu-qian, *et al.* In-orbit radiometric calibration technology based on diffuse reflection plate in full bore, full FOV and full optical path[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, **37**(2): 92-99.
赵艳华,董建婷,张秀茜,等. 漫反射板全光路全视场全口径在轨辐射定标技术[J]. 航天返回与遥感, 2016, **37**(2):92-99.
- [3] YANG Ben-yong, ZHANG Li-ming, SHEN Zheng-guo, *et al.* Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1851-1868.
杨本永,张黎明,沈政国,等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(8): 1851-1868.
- [4] SHI Jia-ding, ZHANG Li-ming, CAO Jia-xing, *et al.* Design and research of diffuser panel used for on-board calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(8): 339-347.
施家定,张黎明,曹兴家,等. 星上定标漫反射板设计研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(8):339-347.
- [5] QI Chao. Measurement and application research of BRDF[D]. Harbin Institute of Technology, 2005.
齐超. 双向反射分布函数测量技术与应用研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2005.
- [6] PATRICK H J, ZAROBILA C J, GERMER T A, *et al.* The NIST Robotic Optical Scatter Instrument (ROSI) and its application to BRDF measurements of diffuse reflectance standards for remote sensing[C]. SPIE, 2013, **8866**(2): 1-15.
- [7] NEVAS S, MANOCHERI F, IKONEN E. *et al.* Gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflectance[J]. *Applied Optics*, 2005, **43**(35): 1-9.
- [8] LI Jun-lin, ZHANG Li-ming, CHEN Hong-yao, *et al.* Development of BRDF absolute measuring device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5): 1-8.
李俊麟,张黎明,陈洪耀,等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, **34**(5):1-8.
- [9] HUNERHOFF D, GRUSEMANN U, HOPE A. New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection [J]. *Metrologia*, 2006, **43**(2): 11-16.
- [10] LIU Ruo-fan, ZHANG Xian-liang, SU Hong-yu, *et al.* Study of setup for measuring optical bidirectional reflectance distribution function[J]. *Infrared*, 2014, **35**(1): 14-17.

- 刘若凡, 张宪亮, 苏红雨, 等. 光学双向反射分布函数的测量装置研究[J]. 红外, 2014, **35**(1):14-17.
- [11] NICODEMUS F E, RICHMOND J C, HSIA J J, *et al.* Technical report NBSMN-160, geometrical considerations and nomenclature for reflectance[R]. Washington, D C; National Bureau of Standards, 1977.
- [12] HUANG Yu, WANG Shu-rong, ZHANG Zhen-duo, *et al.* Space remote sensing spectrum radiometer UV - vacuum ultraviolet spectral irradiance calibration technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 187-191.
黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 空间遥感光谱辐射计紫外-真空紫外光谱辐照度定标技术[J]. 光子学报, 2007, **36**(S1): 187-191.
- [13] LIU Chang-ming, SHI Xue-shun, CHEN Hai-dong, *et al.* Ultraviolet spectral responsivity of silicon trap detectors traceable to a cryogenic radiometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 93-97.
刘长明, 史学舜, 陈海东, 等. 溯源至低温辐射计的硅陷阱探测器紫外波段绝对光谱响应度测量[J]. 光子学报, 2016, **45**(9):93-97.
- [14] LI Bo, LIN Guan-yu, ZHANG Ming-yu, *et al.* Fabrication of diffuser in UV-VUV space remote sensing instrument [J], *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 475-481.
李博, 林冠宇, 张明宇, 等. 紫外-真空紫外空间遥感仪器漫反射板的制备[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(3):475-481.
- [15] SUN Li-ming, ZHAO Jian-lin, REN Ju, *et al.* Three - dimensional measurement of bidirectional reflection distribution function of samples with different coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2529-2533.
孙礼民, 赵建林, 任驹, 等. 具有不同涂层的样品表面双向反射分布函数的三维测量[J]. 光子学报, 2008, **37**(12): 2529-2533.