

双向反射分布函数绝对测量装置研制

李俊麟 张黎明 陈洪耀 司孝龙 王戟翔 杨宝云 沈政国

(中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 基于太阳-漫射板+稳定性监视辐射计的星上定标方式能有效地提高遥感数据定量化水平,其中漫射板的双向反射分布函数(BRDF)定标精度是高精度星上定标的关键,BRDF 绝对测量可实现漫射板的高精度定标。为解决高精度 BRDF 绝对测量的关键技术,设计了高亮度、高稳定度、高均匀性积分球光源;使用单色仪和单片探测器对大动态范围入射和反射辐射亮度信号进行高精度探测,并利用锁相放大器对信号进行放大和采集;采用样品漫射板三维转动和三维平移及光源一维转动的组合运动形式,以高精密切割手和中空分度盘分别作为样品漫射板和光源的定位机构,可高精度、无遮挡、快速地构建 BRDF 测量所需的几何关系。研制的装置可实现包括“平面外”在内的全角度 BRDF 绝对测量,可测量的入射、反射光束角度范围:天顶角为 $0^\circ\sim 75^\circ$ 、方位角为 $0^\circ\sim 360^\circ$,目前可测量的光谱范围为 $250\sim 1700\text{ nm}$,装置的 BRDF 绝对测量不确定度优于 1% 。

关键词 遥感;定量遥感;星上定标;漫射板;BRDF 绝对测量

中图分类号 TP7.29;TH7.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0528002

Development of BRDF Absolute Measuring Device

Li Junlin Zhang Liming Chen Hongyao Si Xiaolong Wang Jixiang
Yang Baoyun Shen Zhengguo

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The method of on-board calibration based on sun-diffuse panel plus radiometer for stability monitoring can improve the level of quantification of remote sensing data, and the BRDF calibration accuracy of diffuse panel is the key of high-precision on-board calibration, and the BRDF absolute measurement can realize high-precision calibration of the diffuse panel. In order to solve the key technology of high-precision BRDF absolute measurement, we design a high-brightness, high-stability and high-uniformity integrating sphere as the lamp source; using a monochromator and a single detector to detect the incident and reflected radiance signals with large dynamic range accurately, moreover using a lock-in amplifier to amplify and acquire the signals; using high-precision six-axis robot and hollow rotary indexing table orientate sample diffuse panel with three-dimensional rotation and translation and lamp source with one-dimensional rotation separately to construct BRDF absolute measuring geometry with high-precision, non-blocking and speediness. The device can realize omnidirectional BRDF measurements except for that out of plane, and measurable angle range is: azimuthal angle is $0^\circ\sim 360^\circ$, and zenith angle is $0^\circ\sim 75^\circ$. Currently measurable spectral range is $250\sim 1700\text{ nm}$. The uncertainty degree of this device can be less than 1% .

Key words remoting sensing; quantitative remote sensing; on-board calibration; diffuse panel; BRDF absolute measurement

OCIS codes 280.3420; 120.0280

收稿日期: 2013-12-09; 收到修改稿日期: 2014-01-12

基金项目: 中国科学院科研装备项目(YZ201125)、国家 863 计划(2012AA12A3022)、国家自然科学基金(41301374)

作者简介: 李俊麟(1985—),男,博士研究生,主要从事光学标准参与与标准传递测试技术方面的研究。

E-mail: lijunlin@aiofm.ac.cn

导师简介: 张黎明(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

1 引 言

基于太阳-漫射板和稳定性监视辐射计的星上定标方式可实现光学遥感器全光路、全视场、端到端的高频次、高精度定标^[1],有效地提高遥感数据定量化水平。其中漫射板的双向反射分布函数(BRDF)定标精度是影响光学遥感器星上定标精度的关键因素之一,漫射板 BRDF 定标主要通过两种途径实现^[2]:1)通过相对方式定标。在相同照射和观测条件下对样品漫射板和标准漫射板分别进行反射辐照度或辐亮度测量,其比值与相同条件下标准漫射板的 BRDF 定标系数求积即为样品漫射板的 BRDF。标准漫射板 BRDF 定标系数一般从国家计量院方向-半球反射率传递而来^[3],由于传递链路长,定标不确定度在 2% 以上^[4-5],无法满足遥感定量化应用的要求。2)通过绝对测量方式定标。BRDF 绝对测量不引入任何参考标准,直接测量光源入射和样品漫射板反射的辐亮度或辐照度以及相应的几何因子,然后计算得到样品漫射板的 BRDF。

目前,德国和美国等多个发达国家相继建立了 BRDF 绝对测量装置,样品漫射板的测量不确定度在 0.5% 以内^[6-7]。BRDF 绝对测量装置欲实现高精度测量主要须攻克 3 个关键技术:1)高亮度、高稳定性、高均匀性光源设计制造;2)高光谱大动态范围辐射信号精确测量;3)光源、样品漫射板、探测器三者之间的相对空间几何关系精确测定及变换。为解决 BRDF 高精度绝对测量的关键技术特别设计了高亮度、高均匀性、高稳定性积分球光源,且配置水冷和风冷系统;使用单片探测器结合单色仪对入射和反射大动态范围辐亮度信号进行高精度探测,利用锁相放大器进行信号放大和采集;采用高精密六轴串联机械手和中空分度盘分别作为样品漫射板和光源的定位机构,以样品漫射板三维转动和三维平移+光源一维转动共四维转动高精度、快速地构建 BRDF 绝对测量所需的各种几何关系,从而完成 BRDF 测量。

2 BRDF 绝对测量原理

2.1 BRDF 定义

如图 1 所示,物体的 BRDF 即 $f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)$ 指物体表面反射方向 (φ_r, θ_r) 小立体角 $d\omega_r$ 内的反射辐亮度的增量 $dL_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)$ 与入射方向 (φ_i, θ_i) 小立体角 $d\omega_i$ 内入射辐照度的增量 $dE_i(\varphi_i, \theta_i; \lambda)$ 的比值^[8],如下式所示。

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

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。因此, BRDF 不仅与入射、反射辐射量和波长有关,而且与照明和探测之间的几何条件有关,是入射、反射光束方位角和天顶角的四维角度函数。

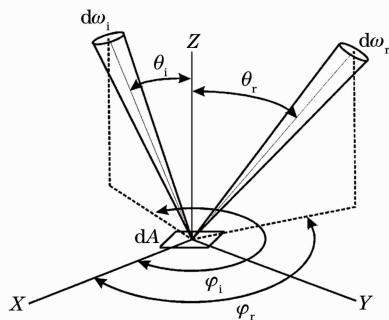


图 1 BRDF 测量几何关系

Fig. 1 Geometry of BRDF measurement

2.2 BRDF 绝对测量原理

根据(1)式物体的 BRDF 需要测量辐亮度和辐照度微分量,而实际应用中微分量测量是不可能实现的,因此必须将(1)式转换为积分的形式:

$$\int_{\Omega_i} f_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda) dE_i(\varphi_i, \theta_i; \lambda) = \int_{\Omega_r} dL_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda), \quad (2)$$

式中 Ω_i 为入射照明立体角, Ω_r 为反射探测立体角。

如果光源均匀性足够好,并且照明和探测立体角足够小时, f_r 可近似为常量。同时为消除探测器响应度的影响,根据理想朗伯体辐照度-辐亮度关系将辐照度测量转化为辐亮度测量,(2)式进一步转换为

$$f_r \approx \frac{\int_{\Omega_r} dL_r}{\int_{\Omega_i} dE_i} = \frac{L_r}{E_i} = \frac{L_r}{\Omega_i \cdot L_i} = \frac{R^2}{A \cos \theta_i} \cdot \frac{DN_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)}{DN_i(\varphi_i, \theta_i; \lambda)}, \quad (3)$$

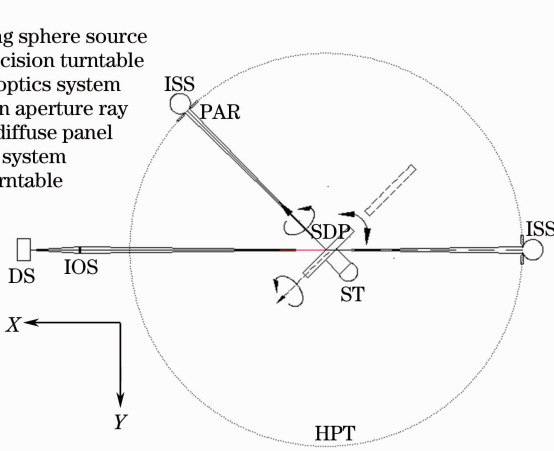
为表示简洁中间过程略去角度和波长依赖项。其中 A, R 分别表示积分球出光口精密孔径光阑的面积及其到样品漫射板之间的距离, DN_i, DN_r 分别代表探测器对光源入射辐亮度和样品漫射板反射辐亮度的响应值。因此样品漫射板的绝对 BRDF 可通过测量入射和反射光束的辐亮度及相应的几何因子得到,与探测器响应度无关,且不需要任何标准传递而直接测量计算得到样品漫射板的 BRDF。

2.3 实现原理

本 BRDF 测量装置特点是通过样品漫射板的三维旋转和三维平移及光源一维旋转实现光源入射辐亮度以及不同入射和反射几何条件下样品漫射板反射辐亮度的测量。

如图 2 右所示, XYZ 为实验室坐标系, 反射光束始终与 X 轴一致, 入射光束初始方向为 $-X$, 可在

ISS: integrating sphere source
HPT: high precision turntable
IOS: imaging optics system
PAR: precision aperture ray
SDP: sample diffuse panel
DS: detection system
ST: sample turntable



XY 平面内一维转动(如图 2 虚线所示), 转动角度记为 δ 。样品漫射板依次绕 BRDF 测量坐标系 xyz 的坐标轴 x, y, z 旋转以改变其姿态, 旋转角度分别记为 α, β, γ 。初始状态 XYZ 与 xyz 坐标系关系为 x 轴与 $-Z$ 轴重合, y 轴与 Y 轴重合, z 轴与 X 轴重合。 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0$ 时, $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r) = 0$, 且至始至终 XYZ 与 xyz 的原点重合。

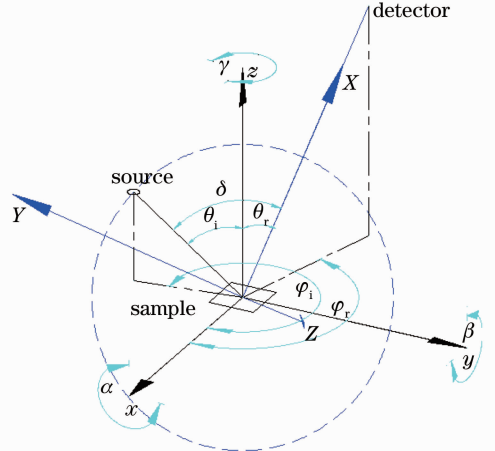


图 2 BRDF 测量实现原理示意图

Fig. 2 Schematic of realization of BRDF measurement

经过理论推导, 可以证明当 BRDF 测量几何条件为 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$ 时, xyz 坐标系各轴以及光源旋转的角度应为 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$, 具体形式为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\cos \theta_i - \cos \delta \cos \theta_r}{\sin \delta \cos \theta_r}\right), \quad (4)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{\cos \theta_r}{\cos \alpha}\right), \quad (5)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sin \theta_i \cos \theta_r \cos \varphi_i - \sin \theta_r \cos \theta_i \cos \varphi_r}{\sin \theta_i \cos \theta_r \sin \varphi_i - \sin \theta_r \cos \theta_i \sin \varphi_r}\right), \quad (6)$$

$$\delta = \arccos[\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i)]. \quad (7)$$

即, BRDF 测量几何条件 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$ 与样品漫射板三维和光源一维转动角度 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ 之间存在一一对应的关系, 因此任意一组 BRDF 测量几何条件都能通过转动样品漫射板和光源的方式构建, 从而完成 BRDF 测量。

3 装置介绍

3.1 光源系统

BRDF 绝对测量装置光源系统主要包括积分球光源、光源监视器、精密孔径光阑和冷却系统等。为了能标定样品漫射板在太阳反射波段(250~2500

nm) 的光谱方向反射特性, 获得高稳定、高均匀性的照明光束, 特别设计了 2 个积分球光源——1 个紫外积分球光源和 1 个可见-短波红外积分球光源。积分球内径为 150 mm, 内壁压制聚四氟乙烯 (PTFE) 作为漫反射面。

为提高样品漫射板反射信号的信噪比, 可见近红外积分球内置 400 W 石英卤钨灯作为光源, 然而积分球工作时产生大量热量, 单一冷却方式不能快速有效地为积分球降温, 因此在积分球壳内特别设计了复杂的水冷管道, 并在灯座上设计了散热片和小型风冷系统。石英卤钨灯光源在紫外谱段能量较弱, 以氙灯为光源的紫外积分球可以增强光源紫外光谱信号。可见-短波红外积分球光源主要参数如表 1 所示。

表 1 可见-短波红外光源参数

Table 1 Parameters of VS-SWIR lamp source

Parameters	Value
Area uniformity	<0.4%
Angle uniformity	$\pm 1^\circ$, <0.1%
Stability	<0.15%h
Aperture diameter	42.067 mm
Source-sample distance	718.43 mm
Irradiate solid angle	$2.69 \times 10^{-3} \text{Sr}$

从表 1 可以看出,积分球光源的稳定性非常高,为了进一步提高测量数据的可靠性,并考虑到后期的数据修正,光源还配备了监视器,与入射和反射辐亮度测量同时监视光源的稳定性。

3.2 变角系统

所谓变角指通过运动机构分别改变样品漫射板法向和照明方向,构建 BRDF 测量所需的入射、反射几何条件。BRDF 绝对测量装置变角系统主要包括六轴串联机械手(以下称样品转台)和中空分度盘(以下称光源转台)等。测反射辐亮度时样品转台负载样品漫射板在测点进行三维转动,光源转台负载光源绕测点在水平面内进行一维转动,结合探测方向分别改变样品漫射板法向和照明方向以构建 BRDF 测量几何关系;测光源入射辐亮度时样品转台负载样品漫射板退避探测光路,光源转台转动光

源正对探测光路,探测系统进行光谱辐亮度测量。

样品转台是 BRDF 绝对测量装置实现 BRDF 绝对测量的关键部件。样品转台本质上是对人上半身运动关节的一种模拟,包括腰部、肩部、肘部和腕部等关节,为完成空间三维姿态和位置定位,机械手配置了六维自由度,如图 3(a)所示^[9],样品转台各自由度的转动范围及部分参数如表 2 所示^[9]。样品漫射板的定位角 α 、 β 和 γ 主要通过 J4、J5、J6 的转动来完成,同时 J1、J2 和 J3 轴也会相应地改变以确保样品漫射板测点位置保持不动。BRDF 测量时,样品漫射板安装于样品转台前端法兰上,由于样品转台具有类人臂的结构,可灵活地对样品漫射板进行各种姿态和位置变换,实现包括“平面外”(入射光线、反射光线和样品漫射板法线不在同一平面内)在内的全角度、无遮挡 BRDF 测量。

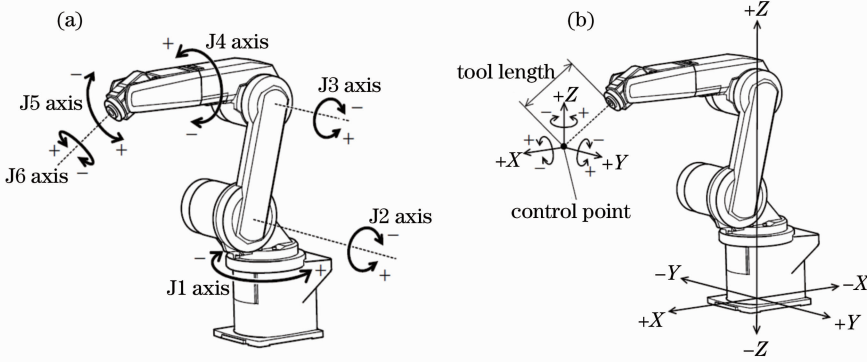


图 3 六轴串联机械手

Fig. 3 Six-axis robot

表 2 样品转台主要参数

Table 2 Main parameters of sample turntable

Parameters	Vaule
J1	$\pm 170^\circ$
J2	$-92^\circ \sim 135^\circ$
J3	$-107^\circ \sim 136^\circ$
J4	$\pm 160^\circ$
J5	$\pm 120^\circ$
J6	$\pm 360^\circ$
Repeat accuracy	$\pm 0.02 \text{ mm}$
Max combined speed	9300 mm/s

对多自由度轴系串联机构的运动控制,一般需要设定基准坐标系,而后进行复杂的齐次坐标变换以设定法兰面的位置及姿态。本装置使用的样品转台已经设计了多套坐标系^[10],并且在这些坐标系之间可任意进行转换,BRDF 测量使用其中的直角坐标系和工具坐标系[如图 3(b)所示]分别改变样品漫射板的位置和姿态。

根据 BRDF 绝对测量实现原理,样品漫射板法向的改变是通过绕 BRDF 测量坐标系各个坐标轴转动来实现的,由于样品转台装配过程中可能存在间隙和非同轴等因素,样品转台标称的坐标轴和原点未必是其实际转动时的转动轴和原点,因此必须对样品转台进行标校以指明其实际的旋转轴(坐标轴)和旋转中心(原点),并将实际的旋转轴和中心设定为 BRDF 测量坐标系的坐标轴和原点。另外,初始状态时 BRDF 测量坐标系 xyz 和实验室坐标系 XYZ 必须建立实现原理所设定的关系,关系主要通过细光束激光和平面镜来建立,装调位置精度优于 0.1 mm ,装调角精度优于 0.01° 。

光源转台角精度优于 $7.14''$,可负载光源绕测点进行 360° 旋转。根据样品转台和光源转台的运动范围,装置可对 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 样品漫射板在入射和反射光束方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、天顶角 $0^\circ \sim 75^\circ$ 范围内完成 BRDF 绝对测量。

3.3 探测系统

BRDF 绝对测量装置探测系统主要包括成像光学系统、斩波器、单色仪、探测器和锁相放大器等。成像光学系统对样品漫射板测点成像,像位于 $\lambda 500$ 单色仪入射狭缝。复色光进入单色仪入射狭缝经准

直后由光栅分光,再经会聚镜会聚至单片探测器,探测器将光信号转换为电信号,由锁相放大器放大并根据斩波器频率提取信号获得光谱 DN 值,如图 4 所示。

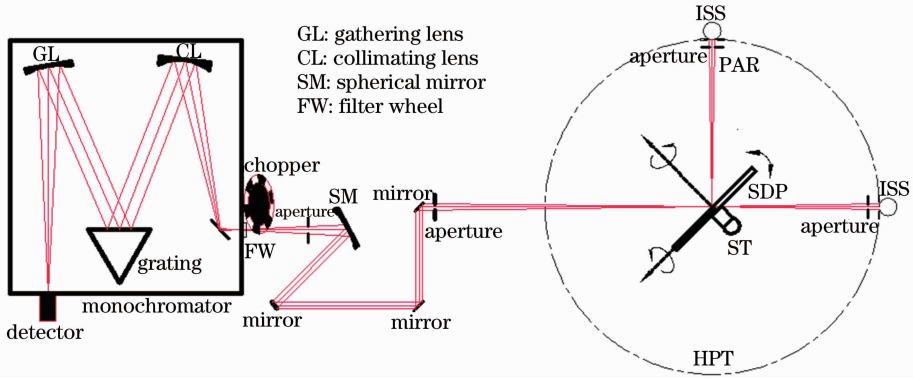


图 4 BRDF 光学系统

Fig. 4 Optical system of BRDF measuring device

单色仪采用光栅衍射分光,由于在测量过程中可能产生高次衍射光谱而干扰测量,因此在单色仪入射狭缝处设置了滤光片轮,共六块高通滤光片。探测系统主要参数如表 3 所示。

表 3 探测系统主要参数

Table 3 Main parameters of detection system

Parameters	Value
Detecting solid angle	$2.69 \times 10^{-4} \text{ Sr}$
Object to image	8.3:1
Spectrum resolution	3 nm at 250~900 nm
Spectrum resolution	6 nm at 900~1700 nm
Detecting linearity	1.2×10^{-5}

3.4 BRDF 测量

为了提高 BRDF 测量速度和精度,特别为装置开发了测控软件,支持多种几何条件 BRDF 一次性自动测量。BRDF 测量流程如图 5 所示,首先进行光源入射辐亮度测量,而后对样品漫射板设定几何条件反射辐亮度进行测量,如此循环直至完成所有设定几何条件的 BRDF 测量为止。

为提高 BRDF 测量速度,样品漫射板和光源定位及光栅初始化设定为同时进行;为保证 BRDF 绝对测量精度,必须等到样品转台和光源转台定位“ready”信号才可进行光谱扫描。

图 6 为 BRDF 测量探测系统光谱扫描过程。由于入射信号约为反射信号的 10^4 倍,另外光源在不同波段的能量存在较大差异,因此测量光源入射信号、反射信号和不同波段光谱时锁相放大器的积

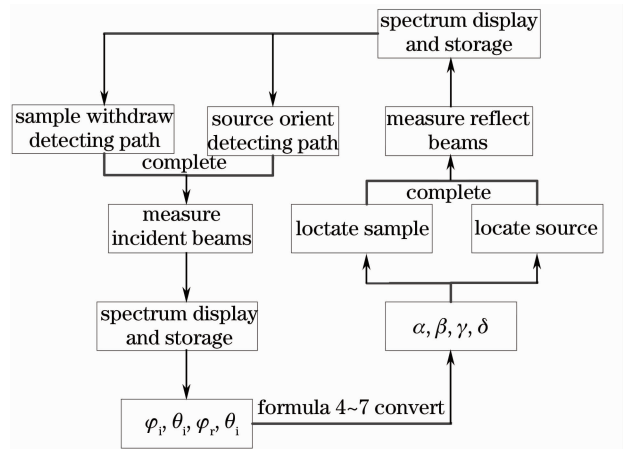


图 5 BRDF 测量流程图

Fig. 5 Flowchart of BRDF measurement

分时间、增益和敏感系数等参数须合理设置,测量过程中所有参数根据测试情况自动修改。

4 实验与讨论

4.1 样品漫射板朗伯性检测

样品漫射板为聚四氟乙烯烧制板。朗伯性检测几何条件:光源垂直照射样品漫射板;探测天顶角 $10^\circ \sim 75^\circ$, 5° 间隔连续变化,方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$, 30° 间隔连续变化。

BRDF 绝对测量装置测控软件根据入射和反射几何条件 $(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r)$, 利用 (4)~(7) 式进行样品转台和光源转台的旋转角 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ 转换,通过样品转台和光源转台分别对样品漫射板和光源进行定位,探测系统进行光谱扫描,测量过程如图 7 所示。

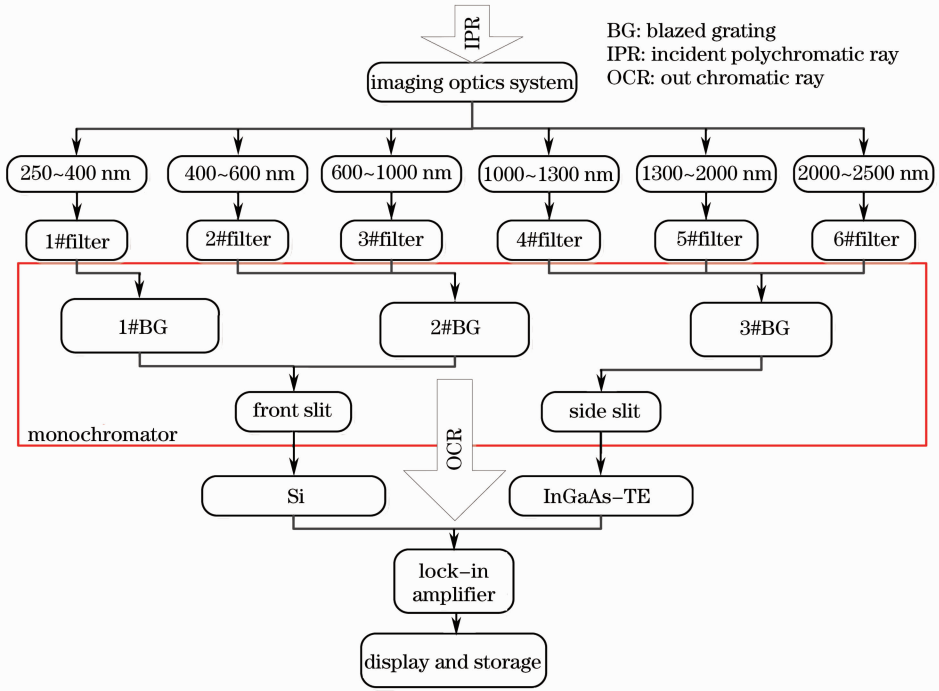


图 6 光谱扫描过程

Fig. 6 Flow chart of spectral scanning

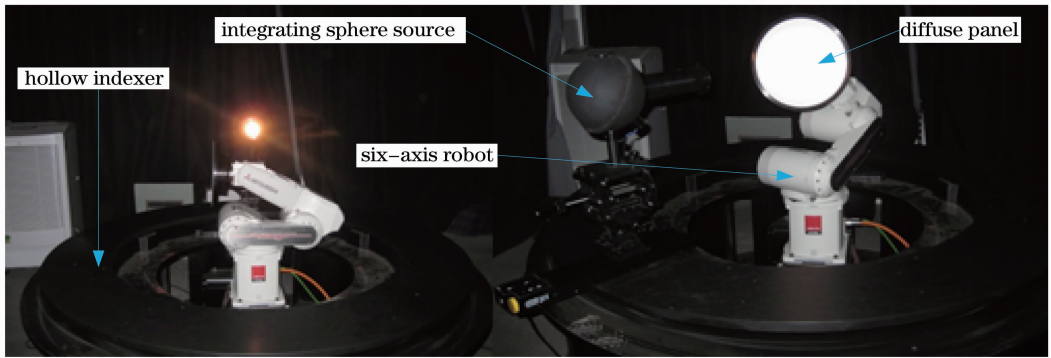


图 7 BRDF 绝对测量装置

Fig. 7 Absolute measurement setup of BRDF

垂直照明, 样品漫射板朗伯性测量结果抽取 500 nm 波段, 其 BRDF 如图 8 所示。

垂直照明, 各种天顶角探测时, 样品漫射板的 BRDF 随方位角变化优于 0.3%, 与国际上 BRDF 绝对测量装置 PTFE 漫射板相同条件下 BRDF 测量结果一致^[1,7]。

4.2 讨 论

如(3)式所示, 物体的 BRDF 是入射、反射光束方位角和天顶角的 4 角函数。BRDF 测量一般依据测量原理分别为光源和探测器设计转动轨道弧, 以实现不同入射、反射几何条件的 BRDF 测量。由于积分球光源为强电设备, 且探测系统包含精密检测设备 and 光学系统, 轨道弧样式装置势必导致高精密

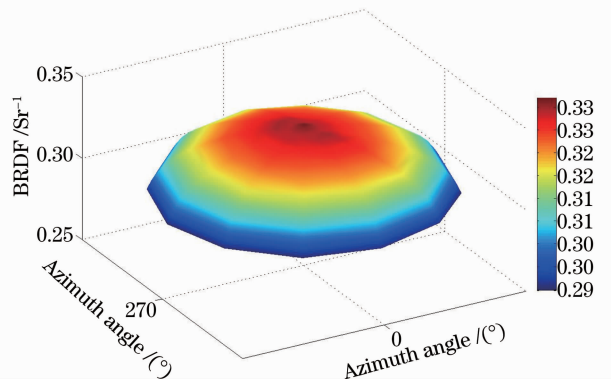


图 8 垂直入射样品漫射板朗伯性

Fig. 8 Lambertian of sample diffuse panel at 0° incidence

设备和大量电缆进行频繁转动,必然降低测量的可靠性、速度和精度。此外,轨道弧样式测量装置极易形成天顶弧、光源和探测器之间的立体角干涉,缩小 BRDF 测量范围,而且杂散光影响难以有效地消除或降低。轨道弧形式的装置入射测量极其困难。因此,根据运动的相对性原理,以样品漫射板三维转动和三维平移+光源一维转动,相对地构建 BRDF 测量所需的 4 角几何条件,如图 2 和 7 所示。采用高精度样品和光源转台可以高精度、快速地构建 BRDF 测量所需几何条件,易实现光源入射测量和小立体角照明及探测。

BRDF 测量实现原理公式近似条件之一:探测立体角足够小,本 BRDF 测量装置探测立体角为 2.69×10^{-4} Sr。为消除不同探测器之间响应度差异的影响,装置使用同一探测器对入射和反射辐亮度进行探测,因此探测器必须具有较高的动态范围,同时要求光源具有高亮度、高稳定度等特点。线阵或面阵探测器光谱扫描快,但是线阵或面阵探测器动态范围较小,而单片探测器动态范围较大。因此装置以单片探测器结合单色仪分光进行入射、反射

辐亮度光谱扫描探测,使用斩波器和锁相放大器对信号进行放大和采集,本装置使用的单片探测器动态范围在 10^5 以上。另外,装置还使用了高亮度、高稳定度、高均匀性积分球光源,可以有效地提高探测器的信噪比。

目前 BRDF 测量主要通过相对测量方式来完成,这些多为手动或半自动装置。本套 BRDF 绝对测量装置测量过程完全实现自动化,机械手和分度盘重复定位精度分别优于 ± 0.02 mm 和 $7.14''$, BRDF 测量重复性和可靠性更高, BRDF 测量精度更高。

(3)式是 BRDF 绝对测量不确定度分析的主要依据, BRDF 测量不确定度主要受积分球出光口与样品漫射板之间距离测量精度,积分球光源精密光阑面积测量精度,入射、反射光束方位角和天顶角特别是入射光束天顶角定位精度,入射、反射辐射量测量精度等的影响;此外还受探测器响应线性,放大器增益线性,杂散光,积分球光源均匀性和稳定性等的影响。基于这些因素, BRDF 绝对测量装置的测量不确定度优于 1%,详细情况如表 4 所示。

表 4 BRDF 测量不确定度

Table 4 Uncertainty of BRDF measuring device

Sources	Uncertainty /% ($k=2$)	Sources	Uncertainty /% ($k=2$)
Source stability	0.15	Detecting nonlinearity	0.1
Aperture area	0.095	Stray light	0.15
Wavelength	0.1	Incident beams detect	0.15
Incident zenith angle	0.3	Reflect beams detect	0.5
Source-measuring point	0.01	Combined uncertainty	0.66

5 结 论

根据 BRDF 高精度绝对测量的关键技术,设计了高亮度、高稳定度、高均匀性积分球光源;使用单片探测器和单色仪对入射和反射大动态范围辐亮度进行高精度探测,并利用锁相放大器进行信号放大和采集;采用高精度六轴串联机械手和中空分度盘分别作为样品漫射板和光源的定位机构,以样品漫射板三维转动和三维平移+光源一维转动的组合运动方式构建 BRDF 测量所需的几何关系。研制的装置可快速、高精度、无遮挡、全自动地实现包括“平面外”在内的全角度 BRDF 绝对测量,可测量的入射、反射光束角度范围:天顶角 $0^\circ \sim 75^\circ$ 、方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$,目前可测量的光谱范围 $250 \sim 1700$ nm。装置的 BRDF 测量不确定度优于 1%,可为太阳-漫射板+稳定性监视辐射计星上定标方式的漫射板定

标,提高星上定标精度,提高遥感数据的定量化水平。

下一步将光谱测量范围扩展至 2500 nm。利用位置和姿态变换的灵活性,六轴串联机械手还可以用于 BRDF 相对测量。修改 BRDF 测量实现原理,利用长臂六轴串联机械手还可以研制野外 BRDF 测量装置,全自动、快速、高精度、无遮挡测量和运输方便、快捷架设是其优越性所在。

参 考 文 献

- 1 Yang Benyong, Zhang Liming, Shen Zhengguo, *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.
- 2 Qi Chao. Measurement and Application Research of BRDF [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. 23.

- 齐 超. 双向反射分布函数测量技术与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005. 23.
- 3 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(10): 1425–1429.
- 魏庆农, 刘建国, 江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法[J]. *光学学报*, 1996, 16(10): 1425–1429.
- 4 Chen Hongyao, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. Absolute bidirectional reflectance factor measurement for diffuse reflection standard [J]. *J Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(5): 366–372.
- 陈洪耀, 张黎明, 杨本永, 等. 漫反射参照体双向反射比因子绝对测量研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(5): 366–372.
- 5 Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong, *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212007.
- 徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212007.
- 6 D Hunerhoff, U Grusemann, A Hope. New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection [J]. *Metrologia*, 2006, 43(2): S11–S16.
- 7 Heather J Patrick, Clarence J Zarobila, Thomas A Germer, *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: 886615.
- 8 Xu Xiru. *Remote Physics* [M]. Beijing: Pekin University Press, 2006.
- 徐希孺. *遥感物理* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- 9 Mitsubishi Electric, Mitsubishi industrial robot RV-6SD/6SDL series standard specifications manual [Z], 2002.
- 10 Mitsubishi industrial robot CRnQ/CRnD controller instruction manual detailed explanations of functions and operations [Z], 2002.

栏目编辑: 殷建芳