

近红外波段高精度 BRDF 测量系统研究

李卓然, 李雨霄, 刘子龙*

中国计量科学研究院光学所, 北京 100029

摘要 近红外波段的双向反射分布函数(BRDF)能够有效表征材料的反射特性,广泛应用于计算机建模、遥感、航天等领域。为了高精度测量近红外波段的 BRDF 值,研制了一套近红外波段的 BRDF 测量系统,提出了基于等面积亮度的单次绝对测量方案。该测量系统以被测样品中心为基点对测量系统的空间坐标系进行重新建模,使用六轴机械臂作为变角装置实现建模,能够无死角地改变样品的三维空间朝向,可以在 2π 半球空间内测量任意角度组合的材料 BRDF 值,该测量方案高精度测量了覆盖 1000~3000 nm 近红外波段的材料 BRDF 值。使用该系统对标准漫反射金板的 BRDF 值进行测量,结果表明测量结果的相对不确定度为 1.5%,说明所研制的系统实现了高精度测量。

关键词 测量; 双向反射分布函数; 绝对测量; 近红外; 不确定度; 散射

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1212002

High-Precision BRDF Measurement System in Near Infrared Band

Li Zhuoran, Li Yuxiao, Liu Zilong*

Division of Optical Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract Bidirectional reflection distribution function (BRDF) in near infrared band can effectively characterize the reflection properties of materials and is widely used in computer modeling, remote sensing, aerospace, and other fields. In order to measure the BRDF value of near infrared band with high precision, a near infrared band BRDF measurement system is developed, and an absolute measurement scheme based on equal area luminance is proposed. The measurement system takes the center of the tested sample as the base point to re-model the spatial coordinate system of the measurement system, and uses the six-axis manipulator as the angle-changing device to realize the modeling, which can change the three-dimensional orientation of the sample without blind angles. The BRDF values of materials with any angle combination can be measured in 2π hemispheric space. The BRDF values of materials covering the near infrared band of 1000 nm to 3000 nm are measured with high precision. The system is used to measure the BRDF value of the standard diffuse reflection gold plate, and the results show that the relative uncertainty of the measurement result is 1.5%, indicating that the developed system has achieved high-precision measurement.

Key words measurement; bidirectional reflection distribution function; absolute measurement; near-infrared; uncertainty; scattering

1 引言

双向反射分布函数(BRDF)基于波长、入射光的天顶角和方位角、反射光的天顶角和方位角这 5 个变量函数,能够有效描述材料表面的反射特性,对

材料光学特性的分析^[1-4]、遥感精度的提升^[5-7]、计算机建模^[8-10]都有重要作用,广泛应用于材料、遥感、航天等领域^[11-12]。

传统的 BRDF 测量系统中的变角装置主要采用圆形导轨式机械结构^[1,5,13-14]。圆形导轨式

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-01-04; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61875180)、国家重点研发计划(2017YFF0205103)

通信作者: *liuzl@nim.ac.cn

BRDF 测量系统将光源和探测器分别安放在两条可转动的圆形导轨上,并通过转动导轨、滑动光源与探测器来改变入射光的照射角度和反射光的探测角度,导轨的转动角度、光源探测器的滑动角度与入射光的反射光角度一一对应,上述操作简便,易于实现。由于光源系统与探测器系统均需要安放在导轨上,故它们的体积受到了限制。受导轨大小的影响,其转动角度难以精细调整,所以导轨式 BRDF 测量系统只适合于粗测量,难以实现高精度的 BRDF 测量,这制约了 BRDF 的应用^[15]。

随着机械臂的快速发展,采用机械臂作为 BRDF 测量系统的变角装置逐渐获得科研人员的青睐。机械臂式 BRDF 测量系统可以固定探测系统或光源系统,只需使用机械臂三维转动待测样品和使用转台一维转动光源或探测器,即可实现 BRDF 入射与反射 4 个角度的变化。由于光源和探测器不需要进行复杂的转动操作,故系统对体积无严格限制,更易提升测量精度。机械臂能够实现更高精度的角度控制,适合于 BRDF 的高精度测量。目前,国外的 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)^[16]、NIST (National Institute of Standards and Technology)^[17-19],以及国内的中国科学院安徽光学精密机械研究所^[15,20]均搭建了机械臂式 BRDF 测量系统。其中 NIST 所搭建的 BRDF 测量系统的波段覆盖范围为 500~2450 nm,中国科学院安徽光学精密机械研究所搭建的 BRDF 测量系统的波段覆盖范围为 250~1700 nm,但上述 BRDF 测量系统在可见光波段能够将不确定度控制在 1% 以内,并且在近红外波段不确定度较大,并且在国际上鲜有已公布的关于近红外波段的材料 BRDF 值的权威数据。

为了拓展测量 BRDF 的波段覆盖范围、提升近红外波段的测量精度、提供近红外波段的材料 BRDF 值,本文提出基于等面积亮度的单次绝对测量方案,研制一套近红外波段的 BRDF 测量系统。使用该系统对样品空间进行建模,采用六轴机械臂搭配一维转臂作为变角系统可以实现建模。研制的 BRDF 测量系统可以覆盖 1000~3000 nm 的近红外波段,能够测量 2π 半球空间内任意角度组合的材料 BRDF 值。研制的 BRDF 测量系统可以同时测量并给出标准漫反射金板的近红外 BRDF 值,测量结果的相对不确定度为 1.5%,实现了对近红外波段材料 BRDF 的高精度测量。

2 BRDF 测量原理

2.1 BRDF 定义

BRDF 是指在反射方向小立体角 $d\omega_r$ 内反射辐射亮度增量 $dL_r(\lambda; \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 与入射方向小立体角 $d\omega_i$ 内入射辐照度增量 $dE_i(\lambda; \theta_i, \varphi_i)$ 的比值^[21],其定义式为

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

式中: θ 和 φ 分别表示天顶角与方位角;下标 i 和 r 分别表示入射和反射; λ 表示波长。BRDF 的几何位置关系如图 1 所示。

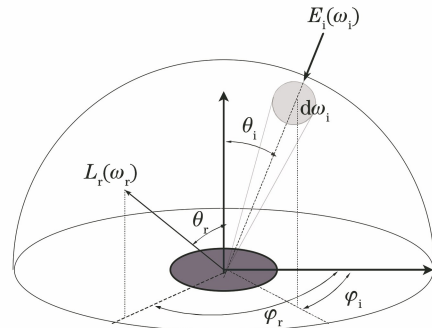


图 1 BRDF 的测量几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of BRDF measurement

2.2 基于等面积亮度的 BRDF 单次绝对测量原理

根据 BRDF 定义式,直接计算 BRDF 需要测量入射辐照度与反射辐射亮度的微分量。但在实际测量中微分量难以测量,所以通过测量较小立体角内的积分量来计算 BRDF 值。当光源的均匀性和稳定性足够好,且入射光和反射光的立体角足够小时,式 (1) 可近似为

$$f_r(\lambda; \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \approx \frac{\int_{\Omega_r} dL_r(\lambda; \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{\int_{A_i} dE_i(\lambda; \theta_i, \varphi_i)} = \frac{L_r(\lambda; \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\lambda; \theta_i, \varphi_i)}, \quad (2)$$

式中: $L_r(\lambda; \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 表示反射方向立体角 Ω_r 内辐射亮度 $dL_r(\lambda; \theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 的积分量; $E_i(\lambda; \theta_i, \varphi_i)$ 表示入射方向立体角 Ω_i 内辐照度 $dE_i(\lambda; \theta_i, \varphi_i)$ 的积分量; A_i 表示入射面的面积。对于一束特定波长的均匀入射平行光, BRDF 可以表示为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_0 \cos \theta_i}, \quad (3)$$

式中: E_0 表示入射辐照度; $L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 表示反射亮度。反射光通量 Φ_r 可以表示为

$$\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \Omega_r A_r \cos \theta_r, \quad (4)$$

式中: A_r 表示反射面的面积。同理, 入射光通量 Φ_i 可以表示为

$$\Phi_i(\theta_i, \varphi_i) = E_0 A_i \cos \theta_i. \quad (5)$$

式(4)与式(5)相除可得

$$\frac{\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{\Phi_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \Omega_r A_r \cos \theta_r}{E_0 A_i \cos \theta_i}. \quad (6)$$

令 $\frac{\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{\Phi_i(\theta_i, \varphi_i)} = 1$, 即入射光通量等于反射光通量, 则

$$\frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \Omega_r A_r \cos \theta_r}{E_0 A_i \cos \theta_i} = 1. \quad (7)$$

令 $\theta_i = 0^\circ, \theta_r = 180^\circ$, 则式(7)可化简为

$$\frac{L_r(0, 0; 180, 0) \Omega_r A_r}{E_0 A_i} = 1. \quad (8)$$

令 $A_r = A_i$, 即入射面的面积等于反射面的面积, 则

$$E_0 = L_r(0, 0; 180, 0) \Omega_r. \quad (9)$$

将式(9)代入式(3), 可得

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{L_r(0, 0; 180, 0) \Omega_r \cos \theta_i}. \quad (10)$$

定义方向反射分布特性算子 K_f 可表示为

$$K_f = \frac{1}{L_r(0, 0; 180, 0) \Omega_r}. \quad (11)$$

K_f 是通过测量光源亮度和反射光的立体角得到的, 将其代入式(10)中即可得到计算材料 BRDF 的测量公式, 即

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = K_f \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i}. \quad (12)$$

3 BRDF 测量系统设计

3.1 空间坐标系建模

根据 BRDF 定义, 通过改变光源和探测器的角度可实现 BRDF 测量, 但是频繁转动光源与探测器会对测量精度产生影响, 故设计光源固定不动, 即入射光角度不变, 将样品的三维转动与探测器的一维转动结合来实现 2π 空间内任意测量角度的组合。这就需要将入射光角度 (θ_i, φ_i) 和反射光角度 (θ_r, φ_r) 映射到样品的三维空间朝向 (α, β, γ) 和探测器

的一维转动角度 δ , 其中 α 为样品绕 X 轴旋转的角度, 即俯仰角, β 为样品绕 Y 轴旋转的角度, 即偏航角, γ 为样品绕 Z 轴旋转的角度, 即翻滚角。

为了解算 BRDF 定义中由 $(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 到 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ 的映射, 建立了样品空间坐标系与大地空间坐标系, 样品空间坐标系与大地空间坐标系均以样品中心为坐标原点。大地空间坐标系以固定不动的入射光反方向作为 Z 轴, 以样品中心竖直向下方向为 Y 轴, 并以右手定则确定 X 轴。样品空间坐标系以样品法线为 Z 轴, 当样品坐标系的 Z 轴与大地坐标系的 Z 轴重合时, 大地坐标系的 X 轴和 Y 轴即为样品坐标系的 X 轴和 Y 轴。

在样品坐标系下, 入射光的方向向量为 $(\sin \varphi_i \sin \theta_i, \cos \varphi_i \sin \theta_i, \cos \theta_i)$, 反射光的方向向量为 $(\sin \varphi_r \sin \theta_r, \cos \varphi_r \sin \theta_r, \cos \theta_r)$, 样品的法线向量为 $(0, 0, 1)$ 。在大地坐标系下, 入射光的方向向量为 $(0, 0, 1)$, 反射光的方向向量为 $(0, \sin \delta, \cos \delta)$, 样品的法线向量为 $(\cos \alpha \sin \beta, \sin \alpha, \cos \alpha \cos \beta)$ 。

由于入射光固定不动, 入射光与反射光之间的角度即为探测器的一维转动角度 δ , 即

$$\delta = \text{sgn}[\sin(\varphi_r - \varphi_i)] \times \arccos[\sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r) + \cos \theta_i \cos \theta_r]. \quad (13)$$

同时, 样品法线与入射光之间的夹角为 θ_i , 样品法线与反射光之间夹角为 θ_r , 可列出如下方程:

$$\begin{cases} \cos \theta_i = \cos \alpha \cos \beta \\ \cos \theta_r = \cos \alpha \cos(\beta + \delta) \end{cases}. \quad (14)$$

将式(14)中的两式相除, 可得到

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left(\frac{\cos \theta_r - \cos \delta \cos \theta_i}{\sin \delta \cos \theta_i}\right) \\ \alpha = \arccos\left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \alpha}\right) \end{cases}. \quad (15)$$

若以样品垂直于入射光并与水平面的交线作为方位角的基准线, 则入射光在样品面的投影与基准线的夹角为 φ_1 , 反射光在样品面的投影与基准线的夹角为 $\varphi_2, \gamma = \varphi_1 - \varphi_i = \varphi_2 - \varphi_r$, 即可解出

$$\gamma = \begin{cases} \arctan 2(-\tan \alpha, -\sin \beta) - \varphi_i, & \theta_i \neq 0 \\ \arctan 2[\tan(\delta - \alpha), -\sin \beta] - \varphi_r, & \theta_i = 0 \end{cases}. \quad (16)$$

样品的三维空间朝向 (α, β, γ) 与探测器的一维转动 δ 的计算式分别为

$$\begin{cases} \delta = \text{sgn}[\sin(\varphi_r - \varphi_i)] \arccos[\sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r) + \cos \theta_i \cos \theta_r] \\ \beta = \arctan\left(\frac{\cos \theta_r - \cos \delta \cos \theta_i}{\sin \delta \cos \theta_i}\right) \\ \alpha = \arccos\left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \alpha}\right) \\ \gamma = \begin{cases} \arctan 2(-\tan \alpha, -\sin \beta) - \varphi_i, & \theta_i \neq 0 \\ \arctan 2[\tan(\delta - \alpha), -\sin \beta] - \varphi_r, & \theta_i = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

3.2 基于等面积亮度的 BRDF 单次绝对测量方案

BRDF 测量方案的仿真图如图 2 所示。基于等面积亮度的 BRDF 单次绝对测量方案将光源强度作为定值参数,只需测量一次待测角度下的亮度即可计算得到该角度下的 BRDF 值。由于将光源强度视为定值,故此方案对光源的稳定性提出了较高的要求。为了保证光源系统的稳定性,采用前分光模式,即将光源固定在光学平台上,并在光源前加单色仪进行分光,光束经准直光路后呈平行光出射。此方案一是保证了光源系统的稳定性,二是增强了光源系统的可拓展性。如需拓展波段覆盖范围,只需挪开当前光路中的平面镜,并将拓展光源光路中的平面镜移至现有光路中,即可实现 BRDF 可测光谱范围的拓展。

采用六轴机械臂作为变角装置,而非传统的滑动导轨,这可以将光源和探测器各自的二维转动改为样品的三维转动及探测器的一维转动,上述操作不仅避免了光源系统的转动,也减少了探测器的转动维数,而且频繁转动系统对样品本身的影响较小。

对于探测系统,在探测器前加成像透镜可以对样品局部进行成像。成像方法限制了能够进入探测器敏感面的光束范围,保证了在测量光源以及样品

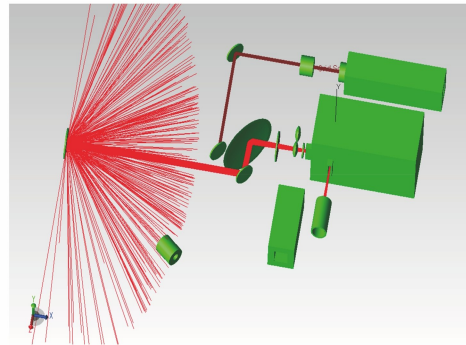


图 2 BRDF 测量方案的仿真示意图
Fig. 2 Simulation diagram of BRDF measurement scheme

反射时的等面积。考虑到在 2π 空间内均有反射光分布、在特定角度下反射光较弱且信噪比差,使用前置放大器与锁相放大器对信号进行放大并抑制噪声以优化信噪比,读取信号值。

根据式(12),测量材料 BRDF 值前,先对光源进行测量以确定 K_i 方向反射分布特性算子,之后将所测 BRDF 的角度组合代入式(14)以解算样品的三维空间朝向与探测器的一维转动角度,测量当前角度下的反射光信号并代入式(12),即可通过单次测量来得到特定角度下的材料 BRDF 值。

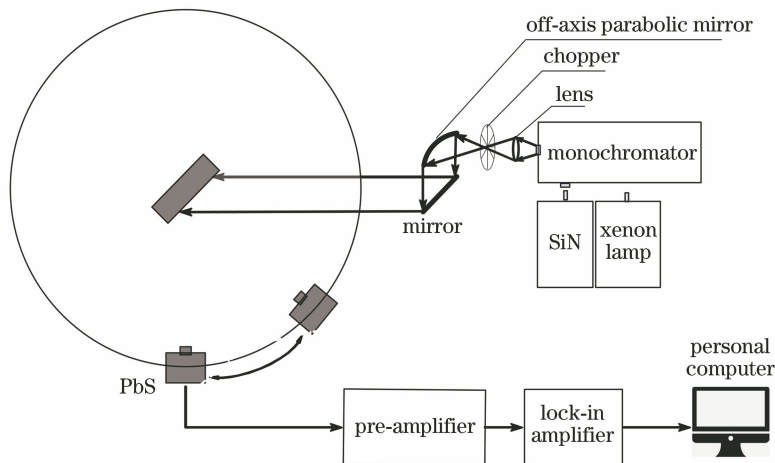


图 3 BRDF 测量系统的原理图
Fig. 3 Schematic of BRDF measurement system

4 BRDF 测量装置

本文所搭建的 BRDF 测量系统共有三部分,分别为光源系统、转角系统与探测系统,系统原理图如图 3 所示,系统实物图如图 4 所示。图 4 中 A 为单色仪, B 为拓展光($10.6 \mu\text{m}$ 激光器), C 为六轴机械臂, D 为待测样品, E 为 PbS 探测器, F 为斩波器, G 为氙灯和氮化硅光源, H 为个人计算机。

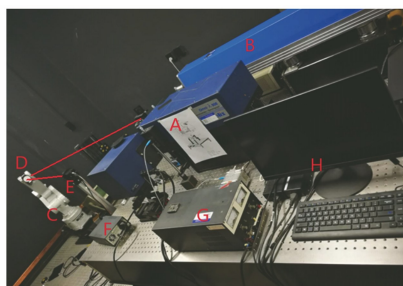


图 4 BRDF 测量系统的实物图

Fig. 4 Physical drawing of BRDF measurement system

4.1 光源系统

为了使波长覆盖 $1000 \sim 3000 \text{ nm}$, 光源系统所用的发光光源有两种, 在 $1000 \sim 1300 \text{ nm}$ 波段选择氙灯光源, 在 $1300 \sim 3000 \text{ nm}$ 波段选用氮化硅(SiN)光源。两种光源均放置在可平移的电动位移台上, 根据实验所需的波段来切换光源。测量装置采用前分光模式, 即在光源前加单色仪, 单色仪选择

卓立汉光的 Omni- $\lambda 500$ 型光谱仪加滤光片轮。光谱仪内部有三块闪耀光栅, 使其能够覆盖 $800 \sim 16000 \text{ nm}$ 的红外波段; 使用闪耀波长为 1250 nm 的一号光栅, 用于 $1000 \sim 2100 \text{ nm}$ 波段的测量; 使用闪耀波长为 3000 nm 的二号光栅, 用于 $2100 \sim 3000 \text{ nm}$ 波段的测量。光谱仪配合六档滤光片轮能够输出指定波长, 经实验评估: 在 1064 nm 波长处准确性的示数误差为 -0.3 nm , 重复性为 0.1 nm ; 在 2000 nm 波长处准确性的示数误差为 0.1 nm , 重复性为 0.1 nm 。从单色仪出射的单波长光经透镜后会聚于一点, 并在该点处放置斩波器以 780 Hz 的频率对出射光进行斩波调制, 用于配合锁相放大器进行噪声抑制^[22], 调制后的出射光经过直角抛物面反射镜与平面反射镜两次反射后呈平行光出射。

为了评价光源系统的性能, 对光源系统单波长的稳定性与准确性进行考察。由于光源系统采用了氙灯和 SiN 光源两种光源, 分别对上述两种光源进行稳定性评价。针对氙灯, 选择 1064 nm 的波长, 在开机预热 20 min 后进行 1 h 的稳定性测量, 得到氙灯在 1064 nm 波长下 1 h 的稳定性为 0.3% 。针对 SiN 光源, 选择 2000 nm 的波长, 同样开机预热 20 min 后进行 1 h 的稳定性测量, 得到 SiN 光源在 2000 nm 波长下 1 h 的稳定性为 0.7% 。两种光源的稳定性测量结果如图 5 所示。

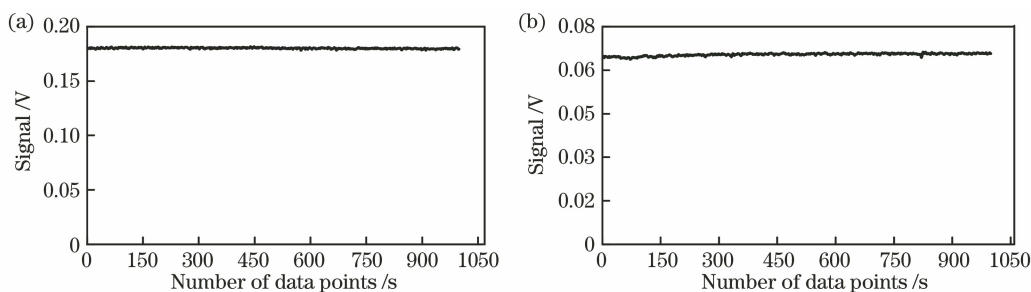


图 5 光源系统的稳定性结果。(a) 氙灯; (b) SiN 光源

Fig. 5 Stability results of light source systems. (a) Xenon lamp; (b) SiN light source

为了考察光源系统单波长的准确性, 使用在近红外波段具有特征吸收峰的氧化钬滤光片作为波长准确性与重复性的评价标准^[23]。波长的准确性和重复性如表 1 所示。

4.2 变角系统

变角系统由六轴机械臂与一维转臂组成。将待测样品放置在六轴机械臂的末端, 将探测器放置在转臂上。六轴机械臂的型号为三菱的 MELFA RV-2FRL, 用于调整样品的三维空间朝向, 角度控制精度能够达到 $1.00'$ 。转臂控制器的型号为卓立汉光

表 1 波长的准确性和重复性

Table 1 Accuracy and repeatability of wavelength

unit: nm			
Calibration	Measurement	Indication error	Repeatability
1069.8	1069.5	-0.3	0.1
1150.2	1150.5	0.3	0.1
1363.8	1363.5	-0.3	0.1
1464.5	1464.1	-0.4	0.1
1523.9	1523.5	-0.4	0.1
1938.4	1938.5	0.1	0.1

的 SC300,用于控制探测器接收反射光的角度,角度精度为 $1.25'$ 。六轴机械臂底座的中心需要与转臂底座的中心重合以保证角度的精准。

将样品的三维转动与探测器的一维转动配合,能够实现半球空间内任意入射角度、反射角度的组合。同时由于光源固定不动,故其体积不再受限制,更易提升稳定性。若选择小型化探测器,则一维转动对探测器体积的限制可以忽略。由于入射光的直径为 10 mm,样品面积也无需过大,所以频繁转动系统对样品本身的光学特性也无明显影响。转臂的转动角度 δ 与六轴机械臂的空间朝向 (α, β, γ) 可根据所测量的 BRDF 的入射光与反射光的天顶角与方位角由式(14)得到。

4.3 探测系统

探测系统使用硫化铅(PbS)探测器,后接放大倍数为 100 的前置放大器,信号经放大后被送入锁相放大器中以滤除噪声,读取信号。所用的 PbS 探测器同时具有大动态范围和高灵敏度的优点,可以直接测量相差 4 个数量级的入射光强信号与反射光弱信号。锁相放大器可以同时接收来自斩波器的频率参考信号与来自探测器的同频信号,将两者相乘再滤波可以有效滤除噪声,用于提取信号,但这显著提升了信号的信噪比。

由于探测器既需要测量光源,又需要测量小信号的反射光,故要求探测器的动态范围要大,同时对于探测器的线性也需要评估和修正。实验采用刀口逐步切割光束的方法对探测器的线性进行评价,实验结果如图 6 所示。从图 6 可以得到,修正后探测器的线性度为 0.9%。

5 实验结果与分析

5.1 BRDF 测量过程

BRDF 测量过程:1)将待测样品固定在六轴机械臂的末端并测量样品厚度,将样品中心设定为机械臂原点;2)将光源预热 20 min 以上使光源稳定工

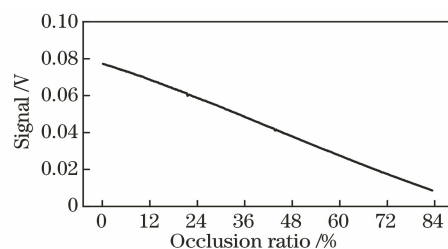


图 6 探测器的线性结果

Fig. 6 Linear result of detector

作,并调节单色仪输出指定波长的光;3)将转臂回转到零位并移开六轴机械臂,使探测器直接测量光源强度并计算 K_f 值;4)将测量 BRDF 所需的角度值代入欧拉角变换公式中,从而得到待测样品的空间三维朝向与探测器的接收角度,即六轴机械臂各轴的转动角度与转臂的转动角度;5)六轴机械臂与转臂转动到位后,测量当前角度下的反射光强度,将其与 K_f 值相乘以计算 BRDF 值。

5.2 测量材料 BRDF

为了评估 BRDF 测量系统的实用性,在 1064 nm 和 2000 nm 两个波长处测量漫反射金板在垂直入射条件下的 BRDF 值,即入射光天顶角为 0° 、方位角为 0° 、反射光方位角为 180° 时的 BRDF 值,测量结果如图 7 所示,其中在 1064 nm 和 2000 nm 两个波长处漫反射金板的测量数据如表 2 所示。

表 2 漫反射金板的 BRDF 测量结果

Table 2 BRDF measurement results of diffuse gold plate

θ_r of 1064 nm /($^\circ$)	BRDF of 1064 nm /sr $^{-1}$	θ_r of 2000 nm /($^\circ$)	BRDF of 2000 nm /sr $^{-1}$
5	1.765	10	2.419
10	1.247	15	1.233
15	0.718	20	0.560
20	0.310	25	0.245
25	0.130	30	0.130
30	0.050	35	0.088
35	0.025	40	0.064
40	0.016	45	0.051
45	0.009	50	0.046
70	0.006	65	0.042
80	0.005	85	0.037

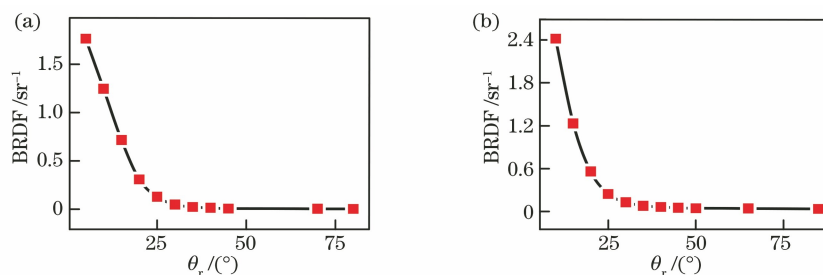


图 7 漫反射金板在不同波长处的测量结果。(a) 1064 nm;(b) 2000 nm

Fig. 7 Measurement results of diffuse reflection gold plate at different wavelengths. (a) 1064 nm; (b) 2000 nm

5.3 结果分析

将表 2 中的 2000 nm 波长下 $\theta_r = 35^\circ$ 数据作为不确定度的分析点, 此时漫反射金板的 BRDF 值为 0.088 sr^{-1} , 重复性为 0.002。在 2000 nm 波长处由光源稳定性 S 引入的不确定度分量为

$$u_{\text{rel}}(S) = \frac{0.7}{\sqrt{3}} \times 100\% \approx 0.404\%。 \quad (18)$$

由波长的准确性和重复性引入的不确定度分量为

$$u_{\text{rel}}(\lambda) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \times 100\% \approx 0.006\%。 \quad (19)$$

由探测器的线性度 T 引入的不确定度分量为

$$u_{\text{rel}}(T) = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.577\%。 \quad (20)$$

由测量的重复性 R 引入的不确定度分量为

$$u_{\text{rel}}(R) = \frac{0.002/0.088}{\sqrt{3}} \times 100\% \approx 1.312\%。 \quad (21)$$

计算式(18)~(21)的不确定度分量, 可得到针对不确定度分析点测量结果的相对不确定度为

$$u_{\text{rel}}(D) = \frac{\sqrt{u_{\text{rel}}(S)^2 + u_{\text{rel}}(\lambda)^2 + u_{\text{rel}}(T)^2 + u_{\text{rel}}(R)^2}}{100\%} \approx 1.49\%。 \quad (22)$$

6 结 论

本文研制了高精度的机械臂式 BRDF 测量系统, 提出了基于等面积亮度的单次绝对测量方案; 对样品空间重新进行建模, 使用六轴机械臂作为变角装置能够实现建模, 改变样品的空间三维朝向, 配合探测器在平面内的一维转动能够实现 2π 半球空间内任意角度的组合。光源系统采用前分光模式, 将光源固定有效保证了光源系统的稳定性, 可测量范围覆盖了 1000~3000 nm 的近红外波段。使用该系统测量了标准漫反射金板在垂直入射条件下多个波长的 BRDF 值, 测量结果的相对不确定度为 1.5%, 这实现了近红外波段的 BRDF 高精度测量。

参 考 文 献

- [1] Hou Q Y, Wang Z L, Su J Y, et al. Measurement of equivalent BRDF on the surface of solar panel with periodic structure[J]. *Coatings*, 2019, 9(3): 193.
- [2] 赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载石英漫反射板双向反射分布函数实验测量研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1565-1570.
Zhao M J, Si F Q, Lu Y H, et al. Bidirectional reflectance distribution function of space-borne quartz volume diffuser [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1565-1570.
- [3] 张景瑜, 任杰骥, 李霏, 等. 基于双向反射分布函数模型的结构光投影自适应调制方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0912001.
Zhang J Y, Ren J J, Li F, et al. Adaptive structured light projection modulation method based on BRDF model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0912001.
- [4] 隋春来, 谭勇, 张焯, 等. 基于光谱双向反射分布函数的纤维物证鉴别[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0930001.
Sui C L, Tan Y, Zhang Y, et al. Fiber evidence identification based on spectral bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0930001.
- [5] 黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. GF-5 全波段光谱成像仪星上定标组件在轨性能评价[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2029001.
Huang W X, Zhang L M, Si X L, et al. On-orbit performance evaluation of on-board calibration component of GF-5 visible and infrared multispectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2029001.
- [6] Jia W, Pang Y, Tortini R, et al. A kernel-driven BRDF approach to correct airborne hyperspectral imagery over forested areas with rugged topography [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 432.
- [7] 李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 室外高光谱 BRDF 自动测量系统的设计[J]. *光学技术*, 2008, 34(2): 262-264, 268.
Li X, Zheng X B, Xun L N, et al. Design of automated field hyperspectral BRDF measurement system [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 262-264, 268.
- [8] Bieron J, Peers P. An adaptive BRDF fitting metric [J]. *Computer Graphics Forum*, 2020, 39(4): 59-74.
- [9] Bitterling M, Bern G, Wilson H R, et al. Physical models of the bidirectional reflectance of solar receiver coatings [J]. *Solar Energy*, 2020, 209: 653-661.
- [10] Jaanson P, Pulli T, Manoocheri F, et al. A reference material with close to Lambertian reflectance and fluorescence emission profiles [J]. *Metrologia*, 2016, 53(6): 1330-1338.
- [11] Li H S, Chen M, Deng C Y, et al. Versatile four-axis gonioreflectometer for bidirectional reflectance distribution function measurements on anisotropic material surfaces [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58

- (12): 1.
- [12] 赵青, 赵建科, 徐亮, 等. 航天消光黑漆双向反射分布函数的测量与应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2627-2635.
Zhao Q, Zhao J K, Xu L, et al. BRDF measurement of matte coating and its application[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2627-2635.
- [13] White D R, Saunders P, Bonsey S J, et al. Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces[J]. Applied Optics, 1998, 37(16): 3450-3454.
- [14] 高奇. 双向反射分布函数测量装置接收系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Gao Q. Study of the receiving system of the bidirectional reflectance distribution function measurement[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [15] 李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于六轴串联机械手的双向反射分布函数测量装置[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2983-2989.
Li J L, Zhang L M, Si X L, et al. BRDF device based on six-axis robot[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2983-2989.
- [16] Hünerhoff D, Grusemann U, Höpe A. New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection[J]. Metrologia, 2006, 43(2): S11-S16.
- [17] Yoon H W, Allen D W, Eppeldauer G P, et al. The extension of the NIST BRDF scale from 1100 nm to 2500 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7452: 745204.
- [18] Patrick H J, Zarobila C J, Germer T A. The NIST Robotic Optical Scatter Instrument (ROSI) and its application to BRDF measurements of diffuse reflectance standards for remote sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8866: 886615.
- [19] Patrick H J, Zarobila C J, Germer T A, et al. Tunable supercontinuum fiber laser source for BRDF measurements in the STARR II gonireflectometer [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8495: 84950K.
- [20] 陈洪耀, 张黎明, 施家定, 等. 高精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.
Chen H Y, Zhang L M, Shi J D, et al. High accuracy gonireflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 72-80.
- [21] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [22] 葛小凤, 陈亚军. 锁相放大器对微弱信号的检测研究[J]. 信息技术, 2016, 40(12): 97-100.
Ge X F, Chen Y J. Study on the detection of weak signal in phase lock amplifier [J]. Information Technology, 2016, 40(12): 97-100.
- [23] 袁礼. 分光光度计波长误差的产生和控制方法[J]. 中国测试技术, 2007, 33(6): 45-47, 51.
Yuan L. Generation of spectrophotometer wavelength errors and their controlling methods [J]. China Measurement Technology, 2007, 33(6): 45-47, 51.