

用于快速 BRDF 测量的子孔径扫描傅里叶变换系统

陆敏*, 王治乐, 高萍萍, 张树青, 郭继镨

哈尔滨工业大学航天学院空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 提出了一种快速测量双向反射分布函数(BRDF)的子孔径扫描傅里叶变换系统。子孔径扫描傅里叶变换方法,使用单个傅里叶变换透镜进行测量,具有扩展单次测量视场、工作距离长、成本低以及系统简单等优点,可以在大空间频率范围内实现 BRDF 的快速有效测量。与角度细分光谱辐射计测量方法相比,子孔径扫描傅里叶变换方法具有更高的灵敏度和精度,提高了检测速度。该方法通过与子孔径扫描方法结合,测量样品平面上散射的光场,并在傅里叶空间中进行数值拼接,扩大了测量 BRDF 的角度范围。最后,利用对比实验数据对该方法进行了验证。实验结果表明,该方法与角度细分光谱辐射计的相对误差小于 1%,测量时间是角度细分光谱辐射计的 1/10,角度分辨率可以达到 0.005°。这些结果为子孔径扫描傅里叶变换系统在快速 BRDF 测量中的应用提供了理论依据和技术支持。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 傅里叶变换; 测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1329001

A Sub-Aperture Scanning Fourier Transform System for Fast BRDF Measurements

Lu Min, Wang Zhile, Gao Pingping*, Zhang Shuqing, Guo Jikai

Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract In this study, a sub-aperture scanning Fourier transform system is proposed for performing the fast measurement of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF). The sub-aperture scanning Fourier transform method that uses a single Fourier transform lens exhibits an expanded single-measurement field of view, a long working distance, and a low cost. Furthermore, the system is simple; thus, rapid and effective measurement of the BRDF can be realized over a large space frequency range. When compared with the angular subdivision spectroradiometer method, the proposed method exhibits higher sensitivity, accuracy, and detection speed. The scattered light field on the sample plane was evaluated through sub-aperture scanning, and numerical splicing was conducted in the Fourier space; the BRDF angle measurement range was expanded. Finally, the proposed method was verified based on the experimental data. The experimental results denote that the relative error between the proposed method and the angular subdivision spectroradiometer method is less than 1%. Further, the measurement time of the proposed method is 1/10 of that of the angular subdivision spectroradiometer method, and the system accuracy can become 0.005°. These results provide theoretical basis and technical support for the application of sub-aperture scanning Fourier transform systems in BRDF measurement.

Key words scattering; bidirectional reflection distribution function; Fourier transform; measurement

OCIS codes 290.5820; 290.1483

1 引 言

近年来,材料表面散射特性的模型与测量在许多研究领域都得到了积极的应用,如材料物理学^[1-2]、工业工程^[3-4],以及图像渲染技术^[5-6]。科技的发展对高精度、快速的散射测量技术提出了更高

的要求。

以球面度的倒数为单位的双向反射分布函数(BRDF)可以描述一般的光学性质,这一术语是由美国国家标准局(NIST)的研究人员在 1977 年定义的^[7],它取决于入射光的性质(波长、偏振态)以及入射光和散射光的方向。对 BRDF 的研究主要集中

收稿日期: 2020-02-14; 修回日期: 2020-03-08; 录用日期: 2020-04-01

* E-mail: 18243087454@163.com

在散射通量随散射角度的变化上。BRDF 的测量需要精密的仪器,这些仪器主要是由计量实验室或仪器实验室开发的,它们被称为角度细分光谱辐射计。这些装置面临的困难是以一定方向照射样品时如何测量散射在各个方向的光。光谱辐射计需要测量无数次才能够保证测量模型更加精确,且由于所测量的信号总是很小,因此这些装置面临的更大挑战在于如何使探测器足够灵敏,以达到足够大的信噪比。自 2000 年以来,这些方面都有了改进,随着精密机械结构的发展,测量所需时间也逐渐减少。欧洲计量研究项目已经运行,以改善参考和测量技术^[8]。为了使设备更紧凑,French Pierre、French Pierre Boher 等开发了使用傅里叶变换光学方法的 BRDF 测量设备,实现了测角角度细分光谱辐射计测量难以实现的测角分辨率^[9](视场角高达 $\pm 88^\circ$,是一个超广角傅里叶光学系统),将 BRDF 测量技术又提升了一个量级。Kim 首次提出采用子孔径拼接方法测量大口径平面镜,并将被测面划分为多个小孔径进行测量,获得的子图像在扫描探测器的整个范围内创建了一个合成孔径,从而得到高分辨率图像^[10-11]。

本文提出一种基于子孔径扫描傅里叶变换系统的 BRDF 快速测量方法。针对超广角系统中较大像差难以校正的情况,提出使用一个普通单透镜作为傅里叶光学元件的新思路。由于单透镜在入射角 40° 以上时工作效率较低,故采用子孔径扫描方法来克服这一角度范围的限制。本文叙述了傅里叶变换方法测量角散射光谱的方法与子孔径扫描扩展探测角度的方法,并通过实验对 BRDF 数据采集过程进

行分析。为了验证该方法的有效性,本文测量了三个不同的样品,并将其数据与角度细分光谱辐射计 BRDF 测量得到的数据进行了比较。结果表明,该技术可以为今后的快速、简便的 BRDF 测量提供更好的思路。

2 用于 BRDF 测量的傅里叶变换法

2.1 BRDF 定义

双向反射分布函数(BRDF)是表征材料表面的散射特性的一种最常用的方法。BRDF 用特定波长下的反射辐亮度 $L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 与入射辐照度 $E_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ 的比值表示,定义为

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

该式描述了在入射方向 (θ_i, φ_i) 和给定波长 λ 条件下由表面材料反射,在反射方向 (θ_r, φ_r) 的辐射强度的变化。

传统的 BRDF 测量是在特定的照明条件下,测量不同观测角度下的辐射量,但是使用这样的设备通过密集测量来获取更精确的 BRDF 是非常耗时的。如图 1 所示,即使配备了快速旋转工作台或基于机器人的机械设计,角度细分光谱辐射计测量 BRDF 的采集时间仍然很长。单个观测角度的 BRDF 点的测量时间约为 1 min,对于一个波长和一个光照方向,以步长 5° 覆盖半个半球,整个测量时间约为 10 h。如果使用同样的操作,将角度步长调为 1° 进行测量,大约需要 10 d 的时间,这实际上是非常棘手的^[9]。

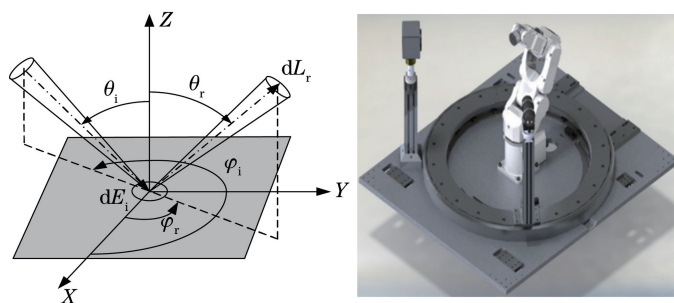


图 1 BRDF 测量原理及 BiRT-2.0 BRDF 测量系统

Fig. 1 Principle of BRDF measurement and the BiRT-2.0 BRDF measurement system

2.2 傅里叶变换原理

与直接测量技术相比,只需简单地应用二维傅里叶变换,就可以数值计算出样品的远场光散射模式^[12]。傅里叶变换具有独特的优点:1)可以在一次测量中获得大角度范围的散射图案;2)由于充分利用了阵列探测器,信噪比极高;3)可以获得微米量级

纹理的光散射图案。

本文的目的是使用单个傅里叶变换透镜,在合理的测量时间测量光谱 BRDF。其原理基于光学傅里叶变换,使用普通的单透镜,将角度场转换为傅里叶平面图^[12]。傅里叶平面图被一个阵列探测器接收,能够实现视场内的所有散射光的同时测量。

图 2 表明了光学透镜的傅里叶变换特性。傅里叶域中的坐标表示波场的空间频率以及与平面波传播方向相对应的方向余弦。傅里叶域的分割能够表征光波场平面波的分解,在傅里叶域中沿着中心位置向外发散的每个单元都与具有特定角

谱的平面波相对应^[13]。图 2 说明光在空间和傅里叶域中的场分布坐标。图 2(a)不仅显示了入射平面内的光照波和散射波,还显示了离轴检测立体角;图 2(b)描述了该傅里叶域对光照波参数的依赖关系。

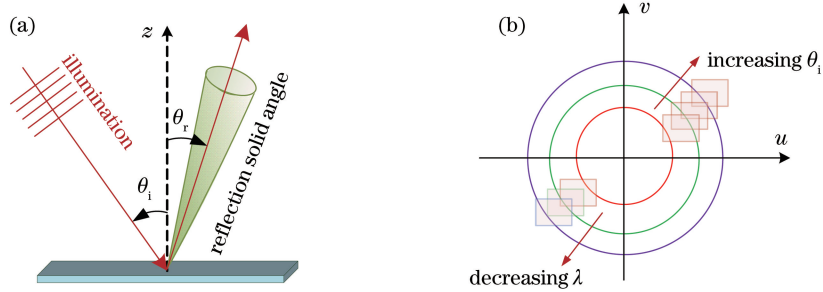


图 2 空间和傅里叶域中的光场分布坐标。(a)空间坐标;(b)傅里叶域坐标

Fig. 2 Coordinates of field distributions in the spatial and Fourier domains. (a) Space coordinates;

(b) Fourier domain coordinates

傅里叶域中每个单元的位置由平行投影的对应方向余弦决定。对应投影方向的单元中心空间频率为

$$E_z(x, y) \propto \iint E(x_0, y_0) \exp[-2\pi i(ux_0 + vy_0)] dx_0 dy_0, \quad (2)$$

式中: $E_z(x, y)$ 为初始场 $E(x_0, y_0)$ 的远场分布; λ 为波长。电场分布 $E_z(x, y)$ 与初始电场的二维傅里叶变换(FT)成正比, $\tilde{E}(u, v) = \text{FT}[E(x, y)]$,其中

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi, v = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi, \quad (3)$$

式中: u 和 v 分别表示 x 和 y 方向上的空间频率; θ 和 φ 分别表示散射矢量的天顶角和方位角。严格地说,(3)式仅在近轴近似中有效,采用广角傅里叶变换方法时会产生大的测量误差。更一般地说,空间

频率和散射角之间是一一对应的。因此,在傅里叶平面上测量得到的简单傅里叶变换电场 $E(x, y)$ 给出了样品的角散射光谱。

2.3 子孔径扫描傅里叶变换系统

傅里叶光学器件是一个透镜(或一组透镜),它可以收集待测微面元散射的光,然后将光线重新聚焦在一个平面(称为傅里叶平面)上。

傅里叶平面中的单元取决于散射光相对该平面的入射角和方位角。由半径 r 和方位角 φ 定义的傅里叶平面上的基本表面照亮度,即

$$E(r, \varphi) r dr = L(r, \varphi) S \sin \theta \cos \theta d\theta, \quad (4)$$

式中: $L(r, \varphi)$ 是待测微面元的亮度; S 是待测微面元的表面积。图 3 为由傅里叶光学变换辐亮度计算的坐标原理图。

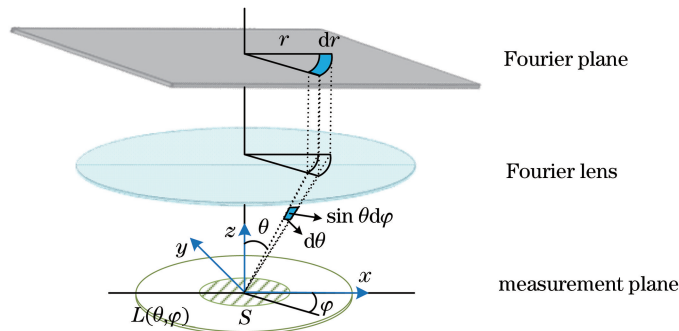


图 3 傅里叶光学变换辐亮度坐标图

Fig. 3 Radiance coordinate diagram under Fourier optical transform

如图 3 所示,由焦距为 f 的普通透镜可得

$$r = f \tan \theta, \quad (5)$$

$$dr = \frac{f}{\cos^2 \theta} d\theta, \quad (6)$$

$$S(\theta, \varphi) = \frac{S_0}{\cos \theta}, \quad (7)$$

其中 S_0 为光源垂直入射时的光斑面积, 则辐射亮度可以表示为

$$E(r, \varphi) = L(r, \varphi) S_0 \frac{\cos^4 \theta}{f^2}. \quad (8)$$

$\cos^4(\theta)$ 随入射角的变化如图 4 所示。对于大于 40° 的入射角而言, 该值非常小。因此, 普通的单透镜可以用作傅里叶光学系统, 但在入射角超过 40° 进行测量时, 几乎得不到结果。

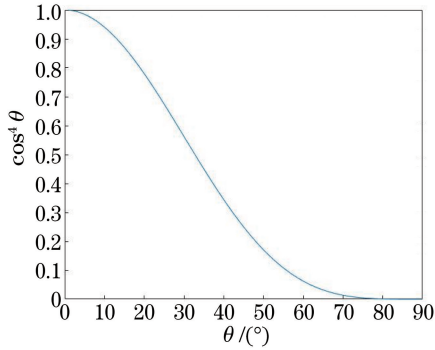


图 4 入射角随 $\cos^4 \theta$ 的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of incident angle with $\cos^4 \theta$

因此提出了子孔径扫描傅里叶变换系统的方法, 该方法不用考虑超广角光学系统中的大像差问题, 仅使用单个普通透镜, 通过球面子孔径扫描来扩

展探测角度范围。散射矢量的最大可测角度 θ_{\max} 由透镜的数值孔径(NA)决定, 数值孔径的表达式为

$$NA = n_m \sin \frac{\theta_{\max}}{2} = \frac{D}{2f}, \quad (9)$$

式中: D 为透镜口径。

为了克服这一角度限制, 本文采用子孔径扫描方法。在本应用中, 傅里叶变换透镜和探测器采取同轴安装, 如图 5 所示, 通过控制三维精密运动平台即可实现子孔径扫描, 通过逐步移动探测器中心, 就可以测量样品所有散射光的角散射光谱。

线阵探测器已经足以满足本方案的验证需求, 但是本文选择面阵探测器来清晰显示散射光谱。这是便于在以后的研究中, 将这项工作与球面子孔径图像拼接相结合, 以进一步简化数据采集的扫描过程。

如图 5 所示, 根据 BRDF 定义, 首先确定照明光源方向, 测量臂沿着①方向移动确定探测方位角, 探测方位角确定后, 探测器在测量臂上沿②方向移动, 获取角度散射信息。重复该过程能够获得所有散射半球的散射数据。将探测器从中心初始位置 $\theta_0 = \frac{\theta_{\max}}{2}$ 以步长 $\Delta\theta = \theta_{\max}$ 沿测量臂扫描获取样品散射光谱图, 每次探测能够获得 θ_{\max} 的散射角光谱, 探测的角度范围能够沿扫描方向拼接扩展至 $N\theta_{\max}$ 。

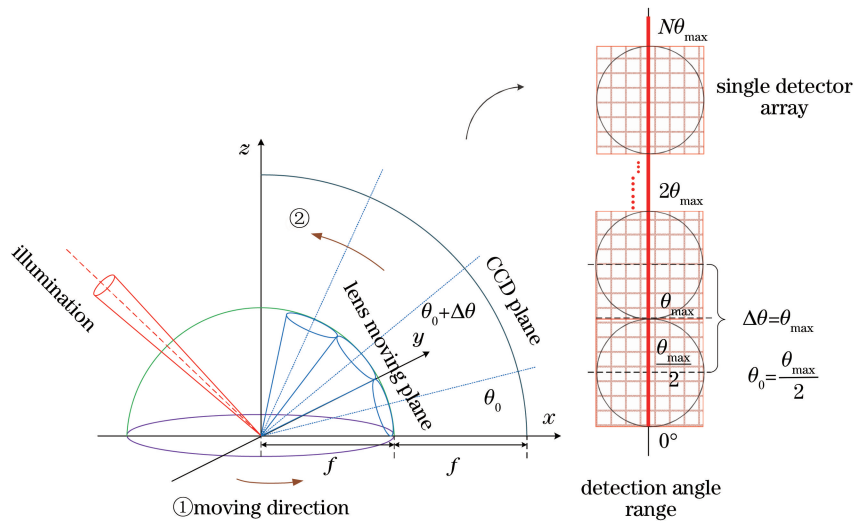


图 5 子孔径拼接原理

Fig. 5 Sub-aperture stitching principle

3 实验验证

3.1 实验原理

本文选择 3 种不同样品, 使用角度细分光谱辐射计和子孔径扫描傅里叶变换系统两种方法进行

BRDF 测量, 样品分别为实验室标准漫反射白板、镜面和划痕镜面样品, 如图 6 所示, 其中划痕宽度为 $8.4 \mu\text{m}$ 。

实验验证过程如图 7 所示, 借助三维精密运动平台, 第一次实验采用角度细分光谱辐射计样品的

BRDF 数据(如①所示),然后将光纤光谱辐射计转换成薄透镜和面阵探测器(如②所示)。本文选择厚度为 3 mm, $NA = 0.087$, 视场为 $\pm 5^\circ$, 直径为 21 mm, 焦距为 120 mm 的薄透镜作为傅里叶变换透

镜面阵探测器,选择使用北京大恒图像有限公司生产的 MER-500-14U3M/C CMOS, 其分辨率为 $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$, 调整仪器使得样品和面阵探测器位于薄透镜两侧的焦平面位置。

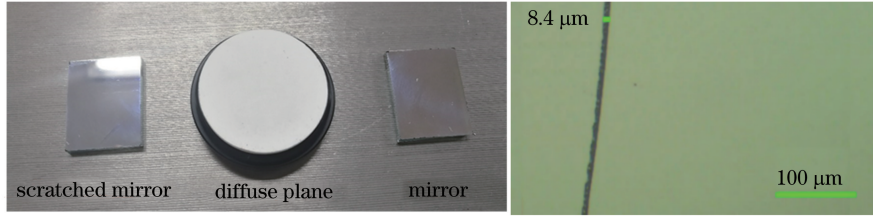


图 6 待测样品以及显微镜测量的划痕尺寸

Fig. 6 Samples to be tested and the scratch measured under microscope

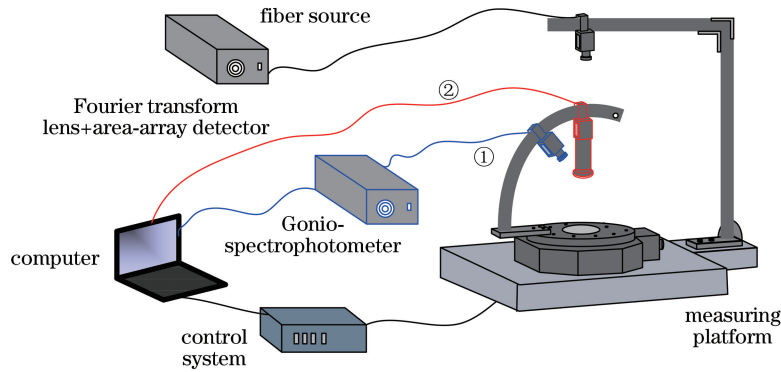


图 7 实验方案

Fig. 7 Experimental scheme

测量机械系统主要由 1 台 ZX110-300、1 台 ZX110-100 和 1 台 RS01-DZ 的精密电控转台、探测器与光源旋臂、样品托等组成,可以测试材料不同光照与探测视点的变化。照明旋臂与探测器悬臂的角度分辨率为 $36''$, 重复定位精度为 $18''$, 精密电控转台的角度分辨率为 $6'$, 重复定位精度为 $36''$ 。为了实现自动测量,本课题借助北京联英精机科技公司编制的运动卡应用软件将光谱仪测量软件、探测器图像采集软件与运动控制软件整合在一起,实现了运动路线的主动控制与测量数据的自动保存。

3.2 BRDF 数据获取

根据亮度守恒定律,可以得到反射辐射亮度与探测器入瞳面处光谱辐射照度之间的关系为

$$dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dE_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \Delta A_{\text{pupol}}}{\Delta \Omega \Delta A_s \cos \theta_r}, \quad (10)$$

式中: E_r 为探测器入瞳处的光谱辐照度; ΔA_{pupol} 为探测器入瞳的面积; ΔA_s 为样品表面照明面源面积; $\Delta \Omega$ 是探测立体角。

根据定义,可得

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} = \frac{dE_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \Delta A_{\text{pupol}}}{\Delta \Omega \Delta A_s \cos \theta_r dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}. \quad (11)$$

已知实际测量过程中样品的探测距离和照明面积,可得 BRDF 测量方程为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{R^2 dE_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{\Delta A_s \cos \theta_r dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (12)$$

式中: E_i 是材料表面在光照下的辐照度,是通过测量垂直入射辐照度并乘以入射角的余弦值获得的; R 为探测距离。

3.3 数据结果分析

在角度细分光谱辐射计对比实验中,测量整个半球空间的 BRDF 数据量很大。为了有效对比方法的有效性,本文只选取一个入射角度、一个反射方位角,来测量反射方位角改变的散射情况。测试的角度选取如下:光源天顶角为 45° , 探测器方位角为 180° , 探测器天顶角为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 角度细分光谱辐射计的探测步长为 1° (每 1° 采集一次辐射数据), 子孔径扫描傅里叶变换系统步长为 10° 。测量波长为

654.988 nm。通过调整样品和检测装置的相对位置,基于 3.2 节介绍的数据处理方法,可以得到标准

漫反射白板、镜面和划痕镜面样品的角散射光谱。结果如图 8~10 所示。

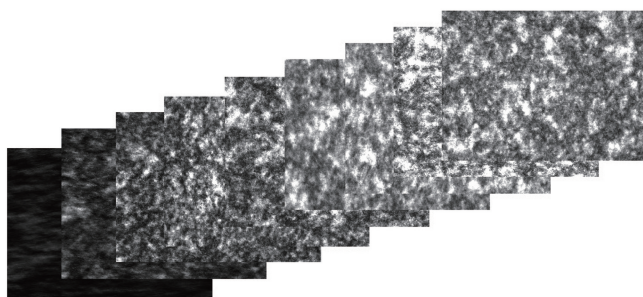


图 8 标准漫反射白板样品的角散射光谱

Fig. 8 Angular scattering spectrum of the standard diffuse plane

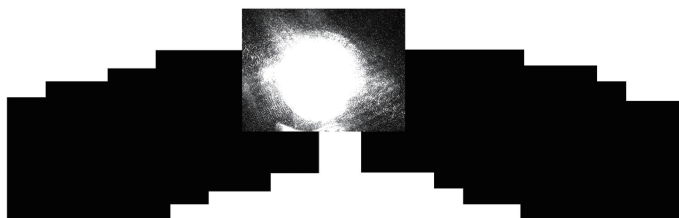


图 9 镜面样品的角散射光谱

Fig. 9 Angular scattering spectrum of the mirror

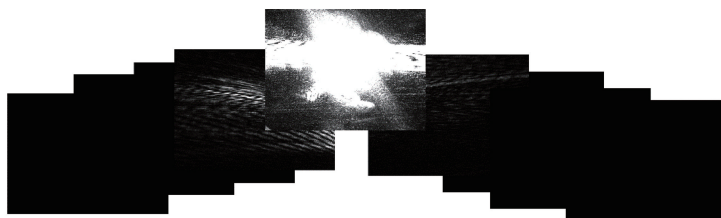


图 10 划痕镜面样品的角散射光谱

Fig. 10 Angular scattering spectrum of the scratched mirror

为验证本文方法的有效性,定义了两个比较数据结果相对误差的评价函数,如

$$E_{RR} = \frac{\sum_n [f_{FT}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) - f_{GS}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)]^2}{\sum_n f_{GS}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)^2}, \quad (13)$$

式中: n 为实验数据组数; $f_{GS}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 和 $f_{FT}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 表示 Gonio 角度细分光谱辐射计和子孔径扫描傅里叶变换方法测量的 BRDF 值; E_{RR} 表示两种方法获得实验结果的相对误差, E_{RR} 越小,两种方法的结果越接近。图 11~13 分别为标准漫反射白板、镜面、划痕面的比较结果。两种方法对标准漫反射平板、镜面以及划痕镜面样品的相对误差分别为 0.34%、0.11%、0.39%,误差很小。子孔径扫描所用的探测 CMOS 像素大小为 1944 pixel×2592 pixel, 本文使用中间两行的平均值。由于充分利用了探测器阵列,因此一次测量可以在 10°内获得 1944 点数

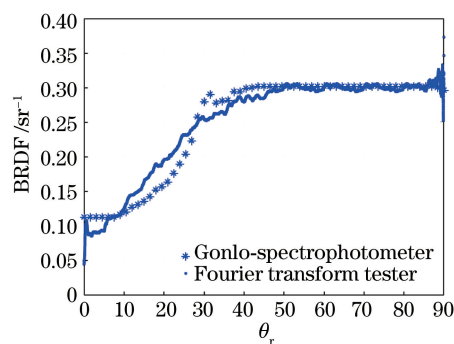


图 11 标准漫反射白板的比较结果

Fig. 11 BRDF comparison of the standard diffuse plane

据,此角度分辨率可以达到 0.005°。由于子孔径扫描傅里叶变换系统的步长为角度细分光谱辐射计系统步长的 10 倍,测量时间是角度细分光谱辐射计的 1/10,故所需的扫描时间更短,效率更高。结果表明,本文建立的子孔径扫描傅里叶变换系统对测量 BRDF 具有良好的效果。

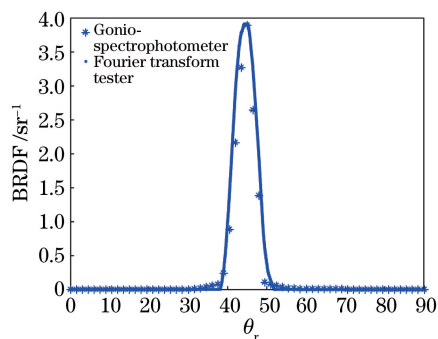


图 12 镜面样品的对比结果

Fig. 12 BRDF comparison of the mirror

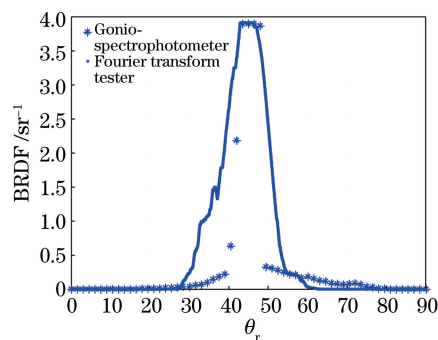


图 13 划痕镜面样品的比较结果

Fig. 13 BRDF comparison of the scratched mirror

4 结 论

基于傅里叶变换原理,通过单次测量即可获得多角度的角散射信息。使用单个普通透镜进行测量,不仅扩展了测量视场,还具有工作距离远、价格低廉、光学系统简单等优点。使用子孔径扫描和傅里叶空间数值拼接克服了单透镜傅里叶变换的角度限制。在分析了实验方案和 BRDF 数据采集过程后,将角度细分光谱辐射计中的光纤角度细分光谱替换为薄透镜与阵列探测器组合。通过对两种系统得到的标准漫反射白板、镜面和划痕镜面样品的 BRDF 数据进行对比,验证了该方法的有效性。实验结果表明,傅里叶变换法与原模拟分析和角度细分光谱辐射计结果吻合良好,两种系统的相对误差均在 1% 以下。此外,该方法可以获得更小的角度分辨率,检测用时更短,效率更高,由此验证了子孔径扫描傅里叶变换方法在 BRDF 测量中以及在角散射测量中的可行性。

参 考 文 献

[1] Huang C, You X H, Zhang B. Influence of surface cleanliness of optical element on its surface scattering characteristics[J]. Infrared and Laser Engineering,

2019, 48(1): 0120002.

黄聪, 游兴海, 张彬. 光学元件表面洁净度对其表面散射特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0120002.

[2] Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function on cutting surface[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1029001.

史卫朝, 郑建明, 李言, 等. 加工表面双向反射分布函数的测量与建模[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1029001.

[3] Chen C, Yi W N, Cui W Y, et al. Influence and correction of BRDF retrieval of surface by atmospheric scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0729001.

陈川, 易维宁, 崔文煜, 等. 大气散射对地表双向反射分布函数反演的影响与修正[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0729001.

[4] Wang X, Zhang Y S, Xu C, et al. Bidirectional reflectance distribution function modeling approach of space objects' fold material[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1024001.

汪夏, 张雅声, 徐灿, 等. 空间目标褶皱材质 BRDF 建模方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1024001.

[5] Chermain X, Claux F, Mérillou S. Glint rendering based on a multiple-scattering patch BRDF [J]. Computer Graphics Forum, 2019, 38(4): 27-37.

[6] Raymond B, Guennebaud G, Barla P. Multi-scale rendering of scratched materials using a structured SV-BRDF model [J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-11.

[7] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance[M] // Radiometry. Sudbury, MA: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1992: 94-145.

[8] Rabal A M, Ferrero A, Campos J, et al. Automatic Gonio-spectrophotometer for the absolute measurement of the spectral BRDF at in- out-of-plane and retroreflection geometries[J]. Metrologia, 2012, 49(3): 213-223.

[9] Simonot L, Obein G, Bringier B, et al. Modeling, measuring, and using BRDFs: significant French contributions[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2019, 36(11): C40.

[10] Yu Y J, Qi T, Wu X. On-line dynamic interference stitching measurement system for large optical elements [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1764-1770.

于瀛洁, 齐特, 武欣. 大尺寸光学元件在位动态干涉拼接测量系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1764-1770.

- [11] Liu A, He Y H, Li Q, et al. Power spectral density test of large aperture optical elements by stitching interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204008.
刘昂, 何宇航, 李强, 等. 大口径光学元件功率谱密度的拼接干涉检测[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204008.
- [12] Ding H F, Wang Z, Nguyen F, et al. Fourier transform light scattering of inhomogeneous and dynamic structures [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(23): 238102.
- [13] Feng X, Han C P, Zou Y P, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0630002.
冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0630002.