

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0353-04

激光散射特性测量

杨 锐, 郑 捷, 万 敏, 路大举, 冷 杰

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 研究了目标表面材料双向反射分布函数(BRDF)的测量方法。根据双向反射分布函数参量的空间位置关系分析了测量系统的激光入射角、反射角在三维空间中的变换。采用三轴旋转方式,保持入射光源的位置不变,调整探测器和待测目标的相对位置,配合一定的空间转换关系,实现了将复杂的三维空间位置关系转换到二维平面进行调节。建立了易于调节、搭建的样品平台,并配合斩波器、锁相放大器和数据采集系统等器件建立了目标表面材料双向反射分布函数测量系统。在入射角 $0^\circ \sim 80^\circ$, 反射高角 $0^\circ \sim 80^\circ$, 反射方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内获得了某一型号导弹头待测表面的双向反射分布函数。

关键词 测量; 双向反射分布函数; 散射; 激光; 目标

中图分类号 O435.1; O436.2 **文献标识码** A

Measurement Method of Laser Scattering

YANG Rui, ZHENG Jie, WAN Min, LU Da-ju, LENG Jie

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The measurement method of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of the object surface is explored. The changes of the incident angle and the output angle of the laser in the measurement system are studied based on the spatial position relation of the parameters of the BRDF. With the three axes circumrotation method, the position of the incident laser is unchanged, and the conversion from the complicate three-dimensional spatial position relation into a two-dimensional plane is realized, by adjusting the relative positions of the detector and the target with certain spatial conversion relation. A sample platform easy to adjust and build is set up, based on which the BRDF measurement system is completed with the wave chopper, phase lock-in amplifier and data collection system. The BRDF of a certain type missile surface is obtained with the incident angle $0 \sim 80^\circ$, reflective angle $0 \sim 80^\circ$ and reflective azimuth $0 \sim 360^\circ$.

Key words measurement; bidirectional reflectance distribution function; scattering; laser; object

1 引 言

伴随新型激光光源和激光探测器件的不断出现,激光目标探测系统在大气遥感和军事目标的跟踪、定位、测距和识别等方面得到了越来越多的应用^[1]。如何设计合理的激光探测系统,如何充分发挥激光探测系统的探测能力已经成为激光探测研究方面的一个重要领域。研究目标在激光照射下散射场的强度、偏振和相位等各种参量的空间分布和变化,将为选择合适的探测方式提供依据,获得较高的探测识别能力和稳定跟踪能力。其中一个最基本的特性是激光沿某一方向入射到目标表面上,在各个方向的反射率,也就是本文研究的目标双向反射分布函数(BRDF)。双

向反射分布函数的测量就是测量目标表面材料在不同方向入射光条件下,不同反射方向上信号的强度特性,为目标探测提供最原始的目标表面特征数据,与环境特性相结合就可以很好地获得复杂环境下目标成像信号特性,为目标探测系统设计提供合理的依据,更好地发挥系统的潜能。

通常的双向反射分布函数测量设备主要包括如下几个部分:光学系统、样品转台、探测器、斩波器、功率检测和相应功能的电子系统^[1~4]。目前国内外还没有 BRDF 标准测量设备,虽然各种测量设备的基本原理差不多,但是由于测量需要变换入射和接收之间的空间关系,同时完成一次测量所需要的时间相当长,这就需要很好地设计整个空间位置的调

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 杨 锐(1977—),男,四川遂宁人,中国工程物理研究院应用电子学研究所硕士,主要从事光学工程研究。

E-mail: youngriver0023@sina.com

节方法,降低调节的难度,保证整个测量过程中测量系统的稳定性。

2 基本原理

目标对入射光的散射能力同目标表面材料的种类、表面的粗糙度以及目标的几何结构有关^[5~7]。在大多数表面对光的反射中,总是镜面反射和漫反射同时存在,在某些情况下,还会出现畸变。尼科迪默斯提出了采用双向反射分布函数来描述表面反射性能。双向反射分布函数的空间几何关系如图 1 所示。

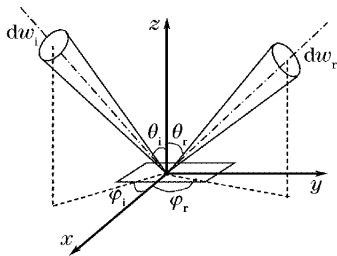


图 1 双向反射分布函数的几何关系

Fig. 1 Geometry of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

双向反射分布函数的定义式如下

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i) = \frac{d[L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)]}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}$$

式中 f_r 称为双向反射分布函数,它是在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射光辐射亮度与在 (θ_i, φ_i) 方向上立体角 $d\omega_i$ 内入射光的辐照度 dE_i 之比,其取值范围由无穷大到零,单位为 SR^{-1} 。

f_r 是一个微分量,不能直接测量,但是可以在一定近似的情况下测量平均值来代替。假设在 $d\omega_r$ 内探测器接收到的光通量为 $d\phi_r$,那么根据辐射传输原理可以获知

$$\begin{cases} d\phi_r = L dA_i d\omega_r \cos \theta_r, \\ d\phi_i = dE_i dA_i, \\ f = \frac{L}{dE_i} = \frac{d\phi_r}{d\phi_i d\omega_r \cos \theta_r}, \end{cases} \quad (1)$$

可以假定在很小的接收立体角 ω_r 内的亮度是均匀的, dA_i 表示入射光照射在待测样品表面的面积。那么(1)式中的 $d\phi_r, d\phi_i$ 和 θ_r 都可以通过测量获得, $d\omega_r$ 则可以根据系统具体的参量通过计算获得,其计算表达式为

$$d\omega_r = A_r / l^2, \quad (2)$$

式中 l 表示探测系统孔径到样品表面的距离, A_r 表示探测器的接收面积。将(2)式代入(1)式可以获得

$$f = d\phi_r l^2 / (d\phi_i A_r \cos \theta_r),$$

这个式子表明双向反射分布函数的测量参量都是可以通过实验室进行直接测量的。

3 测量方法

根据双向反射分布函数的定义可知进行 BRDF 测量所需要调节的变量包括:入射高角、入射方位角、反射高角和反射方位角,直观表现为两个三维变换关系,两个三维位置关系之间还存在相互的依赖关系,是一个复杂三维空间的变化。因此必须建立空间位置调节机构,研究位置调节方法,选择合适的调节规律,使待测目标和探测器之间的相对位置关系按照一定的规律进行调节。根据前面的分析,入射的空间位置关系是由入射光和样品的相互位置决定的,反射的空间位置关系由探测器和样品的相互位置关系决定,样品位置的调节将关系到整个测量中各个位置相互关系的变化,设计合理、调整简单的样品位置调节架在很大程度上决定了测量的可操作性,所以研究 BRDF 的测量首先必须研究适合于测量的样品转台。

该样品平台主要采用三轴旋转,如图 2 中轴 1, 2 和 3 所示。其中轴 1 带动探测器在水平面上进行转动,轴 2 带动轴 3 和样品在垂直面内转动,轴 3 只带动样品转动。在整个转动过程中,光源的入射方向保持不变,始终与轴 2 方向保持一致。通过轴 1, 2 和 3 旋转关系的配合可以将复杂的三维空间的位置关系转换到二维平面进行调节。各轴转动角度与样品、入射光源及探测器空间位置的关系为

$$\begin{cases} \theta_i = a, & \varphi_i = 180^\circ, \\ \cos \theta_r = \cos a \cos c + \sin a \cos b \sin c, \\ \cos \varphi_r = \sin b \sin c / \sin \theta_r. \end{cases}$$

根据上述表达式可知,轴 3 的旋转范围在 $0^\circ \sim 80^\circ$,轴 2 的旋转范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$,轴 1 的旋转范围只需要 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。前面分析的测量方法主要是针对各向同性的样品,如果是各向异性的样品,那就需要调

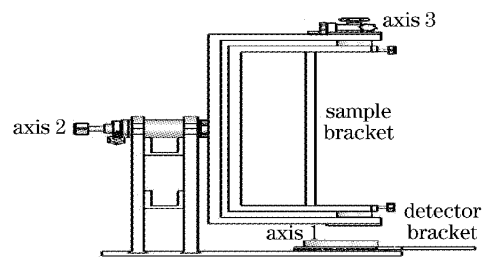


图 2 样品平台结构示意图

Fig. 2 Sample platform

节样品的入射方位角,这时可以在样品架上安装一个同 a 轴垂直的旋转轴,进行入射方位角的调节。

由于双向反射函数的测量是一个长时间的过程,同时在观测角度较大的情况下信号光很弱,因此双向反射函数测量系统必须具备入射功率监测和弱信号检测的能力。功率检测可以采用分光比已知的光学分光镜,在光学上用得较多的弱信号提取主要是采用斩波器调制、锁相放大器进行信号提取的方法来

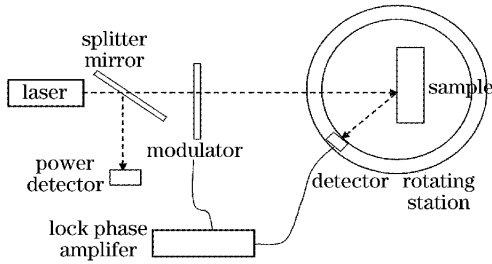


图 3 目标散射测量系统结构示意图

Fig. 3 Framework of target scattering measurement system

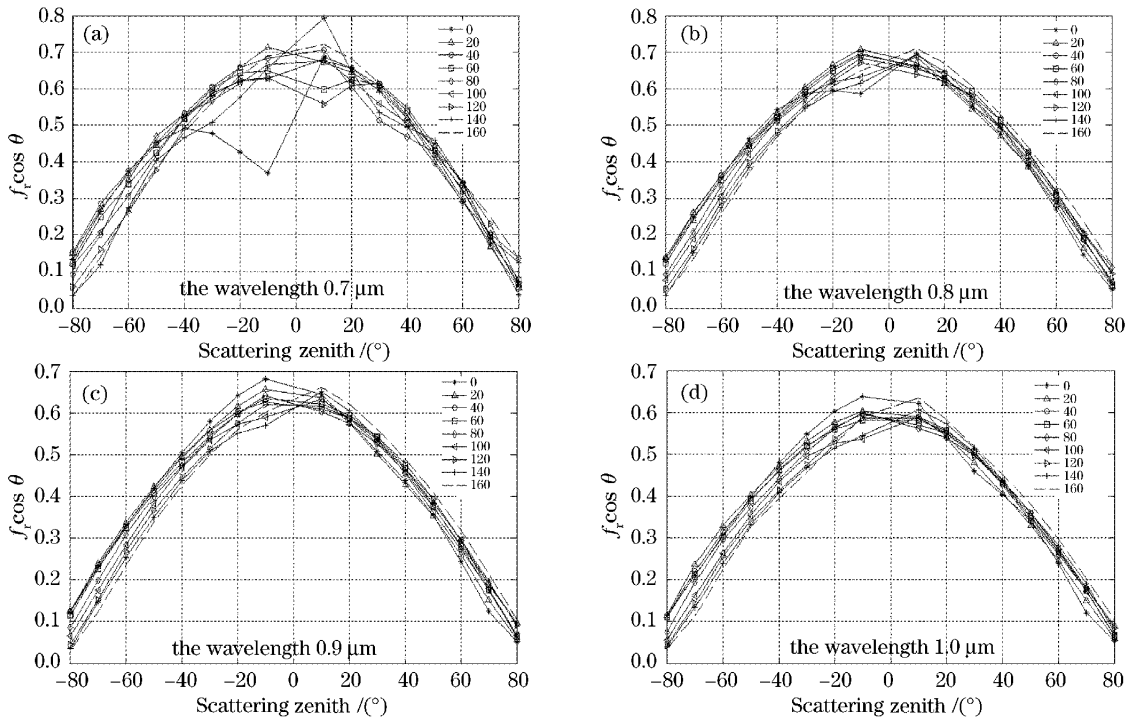


图 4 双向反射分布函数测量值(入射角为 0°),测量波长 $0.7 \mu\text{m}$ (a), $0.8 \mu\text{m}$ (b), $0.9 \mu\text{m}$ (c), $1.0 \mu\text{m}$ (d)

Fig. 4 Measured value of BRDF (the input angle is 0°), the wavelength is $0.7 \mu\text{m}$ (a), $0.8 \mu\text{m}$ (b), $0.9 \mu\text{m}$ (c), $1.0 \mu\text{m}$ (d)

5 结 论

本文建立的样品旋转平台很好地将复杂三维位置调节转换为简单二维调节,使整个系统对某一入射方向激光可以测量反射方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$,反射角 $0^\circ \sim 80^\circ$ 范围内的反射光束。基于该样品平台建立的双向反射分布函数测量系统在实际测量中很好地

抑制周围杂散光的影响。结合测量中需要的各组成部分,双向反射分布函数测量总体结构如图 3 所示。

4 实验测量

在实验室根据对双向反射分布函数测量系统研究结果,设计了一套测量系统,该系统采用如下设备:功率计、斩波器、锁相放大器、前置放大器、能量监测和根据前面的分析设计的一套样品转台,由于实验条件的限制,在本实验中采用光谱仪对光源进行分光来获得了不同波长的入射光源。

在实验室对某一型号的导弹头进行了测量,获得了该导弹头在不同光谱区的双向反射分布函数。测量结果如图 4 所示。

通过对不同波长样品表面材料散射特性的测量,可以得出针对这种导弹表面为白漆的双向反射分布函数在可见和近红外波段上的散射特性是比较一致的,它们之间的双向反射分布函数差异不大。

简化了空间位置的复杂变化关系,降低了调节的难度,采用锁相放大提取信号的方法,增强了微弱信号的提取能力,有效地保证了测量的精度,避免了环境背景对测量的影响,针对某一型号导弹头进行的双向反射分布函数测量证明了该套系统的有效性。

参 考 文 献

- 1 Yao Lianxing, Chou Weili, Wang Fuheng. The Optical Character of Target and Circumstance [M]. Beijing: Astronautics Publishing House, 1995. 274~300
姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境的光学特性 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995. 274~300
- 2 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1425~1430
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): 1425~1430
- 3 Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 262~268
吴振森, 韩香娥, 张向东 等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究 [J]. 光学学报, 1996, **16**(3): 262~268
- 4 Yin Wangbao, Wang Lirong. BRDF measurement of selected surface material under condition of simulation in situ circumstance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 473~476
尹王保, 汪丽蓉. 靶材料 BTDF 现场模拟测量 [J]. 光子学报, 2003, **32**(4): 473~476
- 5 Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901
吴振森, 谢东辉, 谢品华 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法 [J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 897~901
- 6 Guo Lixin, Wu Zhensen, Ke Xizhen. Electromagnetic scattering from 2D band-limited fractal surface using Kirchoff approximation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(9): 128~130
郭立新, 吴振森, 柯熙政. 二维带限分形粗糙面电磁散射的基尔霍夫近似 [J]. 电子学报, 2000, **28**(9): 128~130
- 7 Li Tie, Yan Wei, Wu Zhensen. A parameteric model of bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 769~773
李 铁, 阎 伟, 吴振森. 双向反射分布函数模型参数的优化及计算 [J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 769~773