

激光与光电子学进展

卫星光通信系统中金属结构件的表面散射特性研究

马博伦, 田爱玲*, 王红军, 朱学亮, 刘丙才, 魏晨

西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021

摘要 卫星光通信系统中结构件的表面散射会直接影响信号的传输效率。因此,基于自行搭建的双向反射分布函数(BRDF)测量系统对钛合金、铝合金结构件的表面特性展开测量。首先,分析了1550 nm激光通信波长下结构表面粗糙度和入射角度等因素对BRDF分布的影响。然后,建立了结构件表面的BRDF模型,并通过模拟退火算法获得了最优模型参数。实验结果表明,建模结果与实测结果的相对均方根误差优于7.26%,根据实测数据拟合的ABg模型参数为实际工程应用中的杂散光追迹计算和系统设计提供了必要的参数。

关键词 光通信; 散射特性; 金属结构件; 双向反射分布函数; 杂散光

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220946

Research of Surface Scattering Characteristics of Metal Structures in Satellite Optical Communication System

Ma Bolun, Tian Ailing*, Wang Hongjun, Zhu Xueliang, Liu Bingcai, Wei Chen

Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract The surface scattering of structural components in satellite optical communication systems will directly affect the transmission efficiency of signals. Therefore, based on the self-built bidirectional reflection distribution function (BRDF) measurement system, the surface properties of titanium alloy and aluminum alloy structural parts are measured in this paper. The influence of the structure surface roughness and incident angle on the BRDF distribution at the 1550 nm laser communication wavelength is analyzed. The BRDF model of the surface of the structural part is established, and the optimal model parameters are obtained by the simulated annealing algorithm. The experimental results show that the relative root mean square error between the modeling results and the measured results is better than 7.26%. The ABg model parameters fitted according to the measured data provides the necessary data parameters for the stray light tracing calculation and system design in practical engineering applications.

Key words optical communications; scattering characteristics; metal structure; bidirectional reflectance distribution function; stray light

1 引言

卫星光通信系统内部的杂散光会影响激光通信终端的捕跟及通信,严重时甚至会导致通信链路中断^[1]。杂散光主要分为视场外非目标杂散光、内部辐射杂散光、视场内成像目标杂散光三类^[2]。其中,视场外非目标杂散光严重制约着卫星光学通信系统的信噪比,其主要来源是系统中光机结构件表面的光散射^[3]。为了抑制信号传输过程中的杂散光,提高系统的信噪比,必

须对卫星光通信系统中结构件的表面散射特性展开深入研究。

目前,国内外已相继展开对空间光学领域中光机结构表面散射特性的研究。如:意大利伽利略航空公司搭建了一种用于测量航空黑色涂漆的双向散射分布函数(BSDF)设备^[4];美国国家光学天文台对地基天文望远镜系统中的杂散光进行测量,评估了系统在多个离轴角度下的杂散光特性^[5];加州理工学院喷气推进实验室对日冕仪的镜面污染进行了测试,分析了颗粒污

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-27

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018426C002, JSZL2018411C001)、陕西省科技计划(2019JM-373)

通信作者: *ailintian@xatu.edu.cn

染对于系统杂散光抑制的影响^[6];西北工业大学的李永强等^[7]针对空间相机中铝合金表面散射特性进行研究,测量并对比分析了不同加工工艺表面的双向反射分布函数(BRDF),即表面散射特性;中国科学院西安光学精密机械研究所的赵青等^[8]测量分析了航天消光黑漆(Z306)表面在 0.65 μm 波段的散射特性,得到样片半球空间内的 BRDF,为散射特性的研究提供参考。

上述研究主要围绕系统内部辐射杂散光和视场内成像目标杂散光以及针对单一材料展开,但对于卫星光通信系统中金属结构件表面的光散射,这类视场外非目标杂散光的研究报道较少。因此,本文针对光通信系统中钛合金、铝合金结构件表面散射特性展开研究,测量并分析了在不同结构表面粗糙度(Sa)、入射角度等影响因素下金属结构表面的 BRDF 分布规律。根据实验测试数据建立表面 BRDF 模型,使用模拟退火(SA)算法求解模型参数,并通过对比模型计算的 BRDF 与实验测量值验证模型的可行性。最后,由 BRDF 实测数据拟合得到 ABg 模型的参数,为系统设计中杂散光的追迹仿真提供重要的数据支撑。

2 双向反射分布函数

光机结构表面的散射特性一般可用 BSDF^[9]表示,即 BRDF 和双向透射分布函数(BTDF)的和。光机结构件表面 BTDF 可忽略不计,因此常用 BRDF 描述结构件表面的散射特性,三者之间的关系可表示为

$$X_{BSDF} = X_{BRDF} + X_{BTDF} \approx X_{BRDF}, \quad (1)$$

式中: X_{BRDF} 为双向散射分布函数; X_{BTDF} 为双向透射分布函数。BRDF 由 Nicodemus^[10]在 1965 年提出,其综合描述了入射光经表面微观形貌调制后空间散射能量与入射能量分布之间的关系,进而通过测量分析样品表面的 BRDF 分布充分了解材料表面的散射特性。图 1 为 BRDF 的示意图。其中: θ_i 和 θ_s 分别为入射角和散射角; φ_i 和 φ_s 分别为入射方位角和散射方位角; ω 为立体角。BRDF 定义为沿 (θ_s, φ_s) 方向出射的辐射亮度 dL_s (单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到

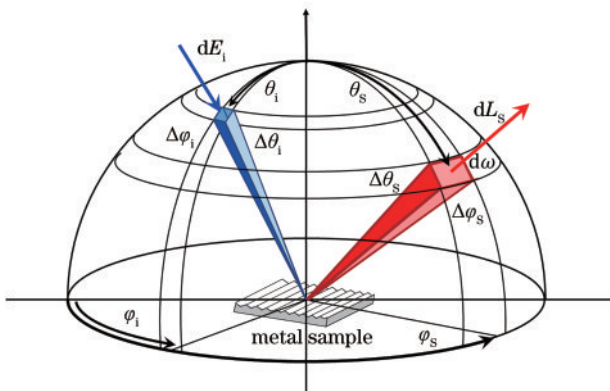


图 1 BRDF 的几何关系

Fig. 1 Geometric relationship of the BRDF

被测表面的辐照度 dE_i (单位为 $W \cdot m^{-2}$)的比值(单位为 sr^{-1}),可表示为

$$X_{brdf}(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega}. \quad (2)$$

用光功率计作为探测器接收各个散射角度的散射光信号,通过分析接收到的散射光分布曲线评价被测表面的质量。角分布散射(ARS)被定义为散射到一个立体角 $\Delta\Omega_s$ 的散射光功率 ΔP_s 与该立体角和入射光功率 P_i 乘积的比值^[11],即 BRDF 与 $\cos \theta_s$ 的乘积, BRDF 可表示为

$$X_{brdf}(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) = \frac{A_{XRS}(\theta_s, \varphi_s)}{\cos \theta_s} = \frac{\Delta P_s(\theta_s, \varphi_s)}{P_i \Delta\Omega_s \cos \theta_s}. \quad (3)$$

2.1 结构件表面的双向反射分布函数

BRDF 是结构件表面反射率、粗糙度、表面形貌分布以及激光波长等多种因素表示的复杂函数,纯理论推导方法会导致建模精度低。因此,通过实际测量结构件表面的 BRDF 反演模型参数以提高模型的准确性。不同于光学元件规则光滑的表面,金属结构件表面的特殊分布会使入射光束发生特有的遮蔽掩饰现象,如图 2 所示。

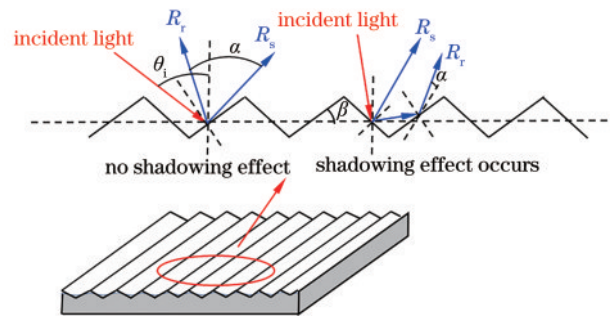


图 2 结构件褶皱表面的光线入射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light incident on the wrinkled surface of the structure

在 Diner 等^[12]的工作基础上对金属结构件的 BRDF 进行建模,同时加入遮蔽掩饰效应对表面特性的影响,从而对模型进行优化。该模型主要考虑目标表面的偏振反射和体散射,因在散射方位角 $\varphi_s=0$ 的情况下分析表面特性,即入射角和散射角之间的数学关系可表示为偏振反射项 $f_{microfacet}$ 与体散射项 $f_{volumetric}$ 之和,即

$$f(\theta_i, \theta_s) = f_{microfacet}(\theta_i, \theta_s) + f_{volumetric}(\theta_i, \theta_s). \quad (4)$$

采用高斯分布作为粗糙结构件表面的微面元法线分布的概率分布函数,可表示为

$$P(\beta)_{Gaussian} = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos^3 \beta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

式中: β 为入射光线方向与微面元法线之间的夹角。

偏振反射项可表示为

$$f_{\text{microfacet}}(\theta_i, \theta_s) = \xi \frac{P(\beta)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_i \cos \beta} \mathbf{L}(-i_2) \cdot \mathbf{M}(\theta_i) \mathbf{L}(i_2), \quad (6)$$

式中: ξ 为经验参数; $P(\beta)$ 为刻面倾斜角 β 的概率密度分布; \mathbf{M} 为反射的穆勒矩阵; \mathbf{L} 为旋转矩阵。遮蔽因子 G 可表示为

$$G(\theta_i, \theta_s) = \frac{1}{1 + U(|\cos \theta_i|) + U(|\cos \theta_s|)}, \quad (7)$$

$$U(\cos \theta) = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{2\sigma^2(1-\cos^2\theta)}{\pi \cos^2\theta}} \right.$$

$$\left. \exp\left[-\frac{\cos^2\theta}{2\sigma^2(1-\cos^2\theta)}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{\cos\theta}{\sigma\sqrt{2(1-\cos^2\theta)}}\right] \right\}. \quad (8)$$

只考虑金属结构件非偏振情况下的 BRDF, 即不考虑旋转矩阵 \mathbf{L} 对 BRDF 分布的影响时, 可将式(6)简化为

$$f_{\text{microfacet}}(\theta_i, \theta_s) = \xi \frac{P(\beta)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_s \cos \beta} G(\theta_i, \theta_s) R(\theta_i). \quad (9)$$

式中: $R(\theta_i)$ 为结构件表面的反射率。体散射在现象上类似于漫反射, 由于表面加工纹路较多, 漫反射与表面粗糙度相关度较大, 所占散射能量成分随着粗糙度的增大而增大^[13]。体散射可表示为

$$f_{\text{volumetric}}(\theta_i, \theta_s) = a \left(\frac{\cos \theta_i \cos \theta_s}{\cos \theta_i + \cos \theta_s} \right)^{k-1} \cdot \exp(b \cdot \cos \eta) \cdot \mathbf{D}, \quad (10)$$

式中: k, a, b 为经验参数; \mathbf{D} 为 Muller 矩阵。 η 与 θ, φ 之间的关系可表示为

$$\cos \eta = \cos \theta_i \cos \theta_s + \sin \theta_i \sin \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_i). \quad (11)$$

金属材料结构件表面的 BRDF 模型最终可表示为

$$f(\theta_i, \theta_s) = \xi \frac{P(\beta)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_s \cos \beta} G(\theta_i, \theta_s) R(\theta_i) + a \left(\frac{\cos \theta_i \cos \theta_s}{\cos \theta_i + \cos \theta_s} \right)^{k-1} \cdot \exp(b \cdot \cos \eta). \quad (12)$$

2.2 ABg 模型

对卫星光通信系统杂散光仿真分析的实际工程应用中, 往往通过 ABg 模型的参数对结构件表面特性进行总体概括, 而国内该领域的数据库较为缺乏, 大部分研究通过个人经验不断调整数值后完成表面特性的设定。因此, 通过大量实测数据对卫星光通信系统常用结构件材料表面参数进行拟合, 为杂散光追迹计算和系统设计提供必不可少的数据支撑。

ABg 模型是描述材料表面 BRDF 特性所建立的经验模型, 广泛应用于各种光机结构表面的杂散光分析^[14], 且可以直接适用于 Fred 仿真分析软件中, 其数

学表达式为

$$X_{\text{brdf}}(|\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|) = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|^g}, \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\beta}_0$ 为散射方向和反射方向的方向正弦; A, B 和 g 为 ABg 模型的待定参数。其中, A 决定散射总能量的大小, B 和 g 决定散射的分布情况。

3 双向反射分布函数的测量系统设计

3.1 测量系统搭建及设置

基于 BRDF 原理搭建了 BRDF 测量系统, 其结构如图 3 所示。该测量系统主要包括激光光源模块、控制转动模块、探测模块和数据采集模块。卫星光通信系统中常选用 1550 nm 波段作为空间卫星光通信链路之间的高码率通信^[15], 因此实验选取波长为 1550 nm 的光纤耦合激光二极管作为光源, 同时选用波长为 635 nm、功率为 70 mW 的固体激光器作为入射光源, 以对比可见光波段与近红外波段下的散射特性。激光光源经扩束准直系统准直后, 经焦距 $f=500$ mm 的会聚透镜聚焦到待测结构件表面, 光斑直径约为 2 mm, 经结构件表面调制后形成半球空间内的散射光经过特定波长的滤光片后, 再经过小孔光阑, 最终由光功率计(感光尺寸为 11.3 mm)接收。光功率计由长度为 450 mm 的支杆连接在大旋转台的立柱上。

实验测量时先将加持有待测结构件的大旋转台调

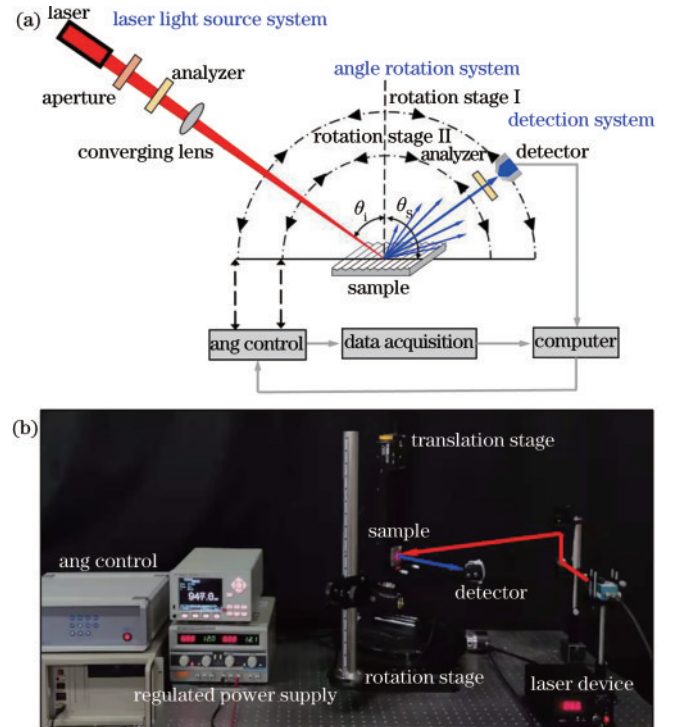


图 3 BRDF 全自动测量系统的结构。(a) 系统构成示意图; (b) 测量系统的现场图
Fig. 3 Structure of the BRDF automatic measurement system. (a) Schematic diagram of the system composition; (b) field diagram of the measurement system

整到初始角度 (-90°), 结构件表面法线与激光入射的夹角范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 每 10° 为一组进行实验测量。确定入射角后, 将连接光功率计探测器的旋转台由 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 以 1° 或 10° 为间隔采集数据。该系统的运行控制均基于 LabVIEW 中 ActiveX 控件及串口通信展开, 可实现对电机的运转控制和扫描轨迹参数设置, 达到对目标位置散射信号的精确测量。

实验测量系统中有多个因素都会对最终 BRDF 的测量造成影响, 这些因素可以归纳为激光光源、旋转扫描、信号探测中, 同时也需要考虑实验环境和人为操作对实验测量结果的影响^[16], 因此 BRDF 测量系统的不确定度可以表示为

$$U_{\text{brdf}}^2 = U_1^2 + U_r^2 + U_o^2 + U_h^2 + U_e^2, \quad (14)$$

式中: U_1 、 U_r 、 U_o 、 U_h 和 U_e 分别为由激光光源、旋转扫描装置、信号探测、人为操作和实验环境引起的不确定度, 具体参数如表 1 所示。计算得到系统的总体不确定度 U_{brdf} 为 4.61%。

表 1 系统不确定度的来源

Table 1 Sources of system uncertainty

Source	Uncertainty
Laser light source (U_1)	0.02
Rotary scanning stage (U_r)	$\sqrt{0.00083^2 + 0.00083^2}$
Optical power detector (U_o)	0.04
Human operation uncertainty (U_h)	0.01
Experimental environment uncertainty (U_e)	0.005

3.2 实验样品

实验研究的对象是表面积为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 不同表面粗糙度的钛合金、铝合金结构件各 3 个 (共 6 个) 被测件。利用 Taylor Hobson 白光干涉仪 (CCI 2000) 测量各样件的表面粗糙度, 形貌测量点数为 1024×1024 , 形貌测试取值范围为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。结构件表面微形貌的测量结果如图 4 所示。

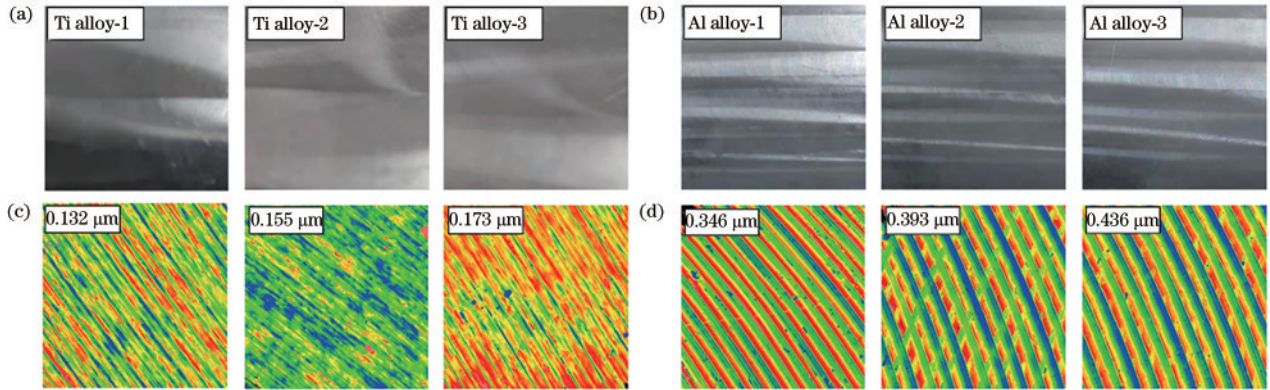


图 4 金属结构件的样件。(a) 钛合金的实物图; (b) 铝合金的实物图; (c) 钛合金的微观形貌测量结果; (d) 铝合金的微观形貌测量结果
Fig. 4 Sample of the metal structure. (a) Physical map of titanium alloy; (b) physical map of aluminum alloy; (c) measurement results of micro-morphology of titanium alloy; (d) measurement results of micro-morphology of aluminum alloy

4 实验结果与分析

4.1 实验测量分析

杂散光在结构件表面传播时的入射角度是不断变化的, 因此, 测量了不同入射角下金属结构表面的 BRDF 散射特性。信号采集时设置 $-90^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ$, 数据采集间隔为 10° , 图 5 为 $10^\circ \leq \theta_i \leq 70^\circ$ 、间隔为 10° , 激光波长 λ 为 635 nm 时金属结构表面的散射信号分布。可以发现, 不同入射角度下金属结构件表面的 BRDF 在镜反射方向附近出现峰值: 当 θ_i 从 10° 增加到 50° 时, BRDF 呈缓慢增长的趋势; 当 θ_i 从 60° 增加到 70° 时, BRDF 出现跳跃增长, 峰值由 23.019 sr^{-1} 迅速增长为 59.313 sr^{-1} 。从结构件表面的微观形貌可以发现, 其表面是具有规则加工纹理的粗糙表面, 因此入射光到达结构件表面前后就会发生两种光能损失情况, 一种是入射光能量无法到达倾斜表面发生遮蔽掩饰现象, 另一种是反射光由于倾斜角无法被探测器接收。这种

现象在大入射角和反射角时尤为明显, 且物体表面越粗糙, 这种现象发生的概率就越高。对比图 5(a1) 和图 5(a3) 发现, 当粗糙度从 $0.132 \mu\text{m}$ 增加到 $0.173 \mu\text{m}$ 时, 结构表面的 BRDF 在入射角为 70° 时由 59.313 sr^{-1} 减小到 47.511 sr^{-1} , 在入射角为 40° 时由 5.205 sr^{-1} 减小到 4.063 sr^{-1} 。

金属结构件在卫星光通信系统中以装夹方式固定, 入射角约为 30° 下系统受杂光的影响最严重, 因此, 测量了结构件在 $\theta_i = 30^\circ$, 波长 λ 为 1550 nm 和 635 nm 下的 BRDF, 结果如图 6 所示。信号采集过程中 $-90^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ$, 以 1° 为数据采集间隔。可以发现, 随着粗糙度的增大, 金属结构件表面的 BRDF 均逐渐减小。但对比钛合金和铝合金材料表面的 BRDF 发现, 铝合金材料的粗糙度大于钛合金, 其 BRDF 也大于钛合金。如图 6(a1) 和 (b1) 中, 铝合金粗糙度为 $0.346 \mu\text{m}$ 时的 BRDF 为 22.689 sr^{-1} , 大于钛合金为 $0.132 \mu\text{m}$ 时的 6.535 sr^{-1} 。原因是钛合金的折射率大于铝合金, 发生

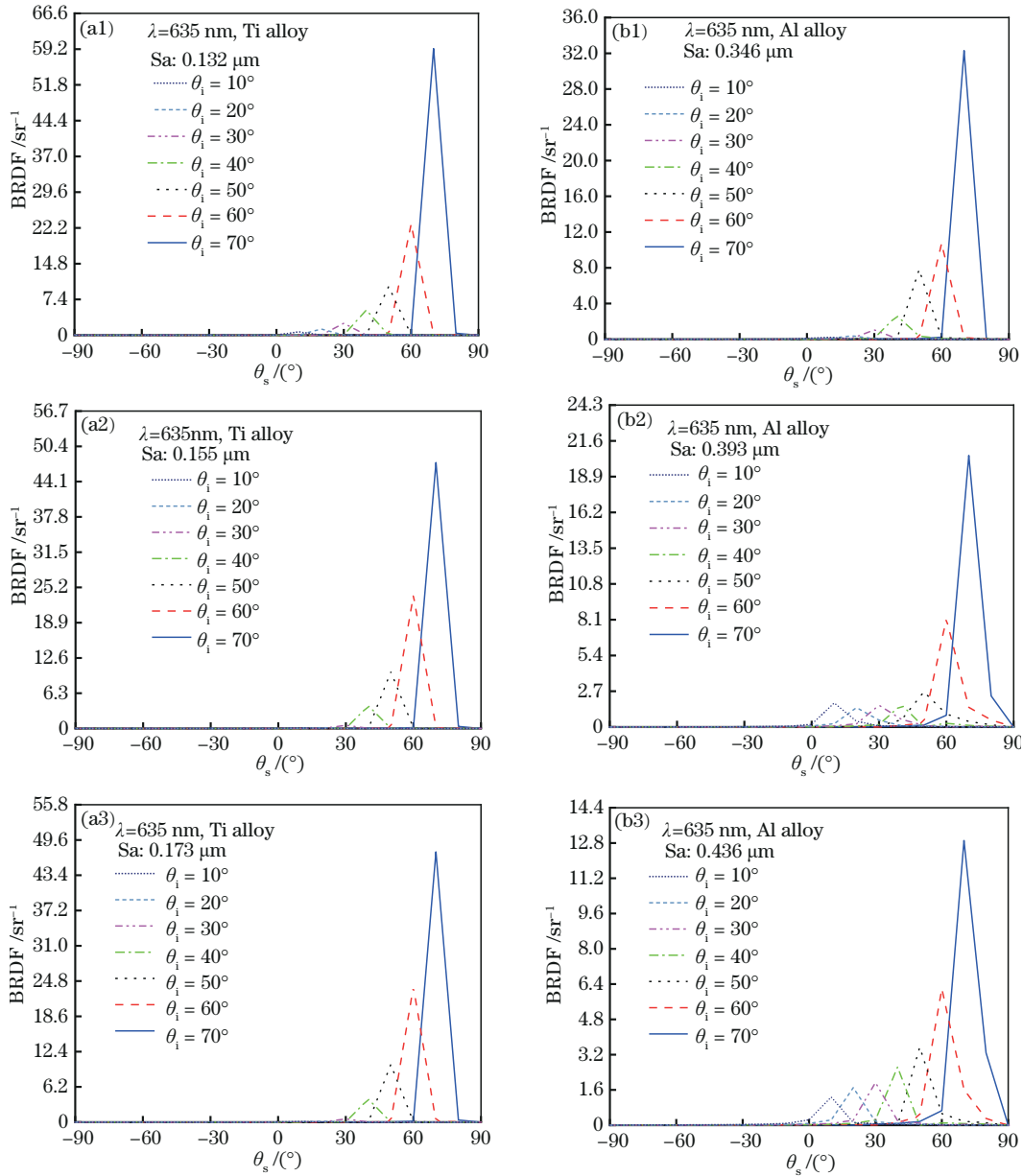


图 5 不同入射角度下结构件表面的 BRDF 分布。(a) 钛合金；(b) 铝合金

Fig. 5 BRDF distribution on the surface of the structural member under different incident angles. (a) Ti alloy; (b) Al alloy

遮蔽掩饰效应时对于光束吸收强,导致材料表面反射特性减弱,散射特性增强。光波的传输过程中伴随着干涉和衍射效应发生,这些现象在结构件表面微观形貌与入射激光波长之间条件特殊时尤为明显。此外,钛合金在 1550 nm 波长下出现了位于镜面反射峰值附近的次峰,铝合金在 635 nm 时出现了次峰。原因是加工纹路形成的狭缝与入射激光满足了光波衍射的条件,发生了衍射现象,但表面的纹理分布情况次级能量迅速衰减,导致次峰的峰值较小,两种材料表面加工纹理的间距不等导致该现象在不同波长时出现。钛合金在波长为 1550 nm 时 BRDF 最大为 6.535 sr⁻¹,在波长为 635 nm 时 BRDF 最大为 15.084 sr⁻¹。这表明波长较大时,结构件表面的反射特性较弱,即结构件表面在波长较大的条件下可以起到更好的杂散光抑制效果。

4.2 模型参数反演及分析

SA 算法^[17]通过模拟物理退火过程以解决组合优化问题的检索最优解算法,具有计算过程简单、鲁棒性强的优点。将模型计算与测量数据的最小均方根误差作为目标函数,确定模型最优参数。目标函数可表示为

$$E(k, \xi, a, b) = \min \sum_{\theta_i} \sum_{\theta_s} g_1(\theta_i) g_2(\theta_s) \times \frac{[f_{\text{model}}(k, \xi, a, b) - f_{\text{measure}}(\theta_i, \theta_s)]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_s} g_1(\theta_i) g_2(\theta_s) [f_{\text{measure}}(\theta_i, \theta_s)]^2}, \quad (15)$$

式中: f_{model} 为模型计算值; f_{measure} 为实测值; $g_1(\theta_i)$ 、 $g_2(\theta_s)$ 为加权函数,用来调整各项误差对总误差的影响。相对 RMSE 可表示为

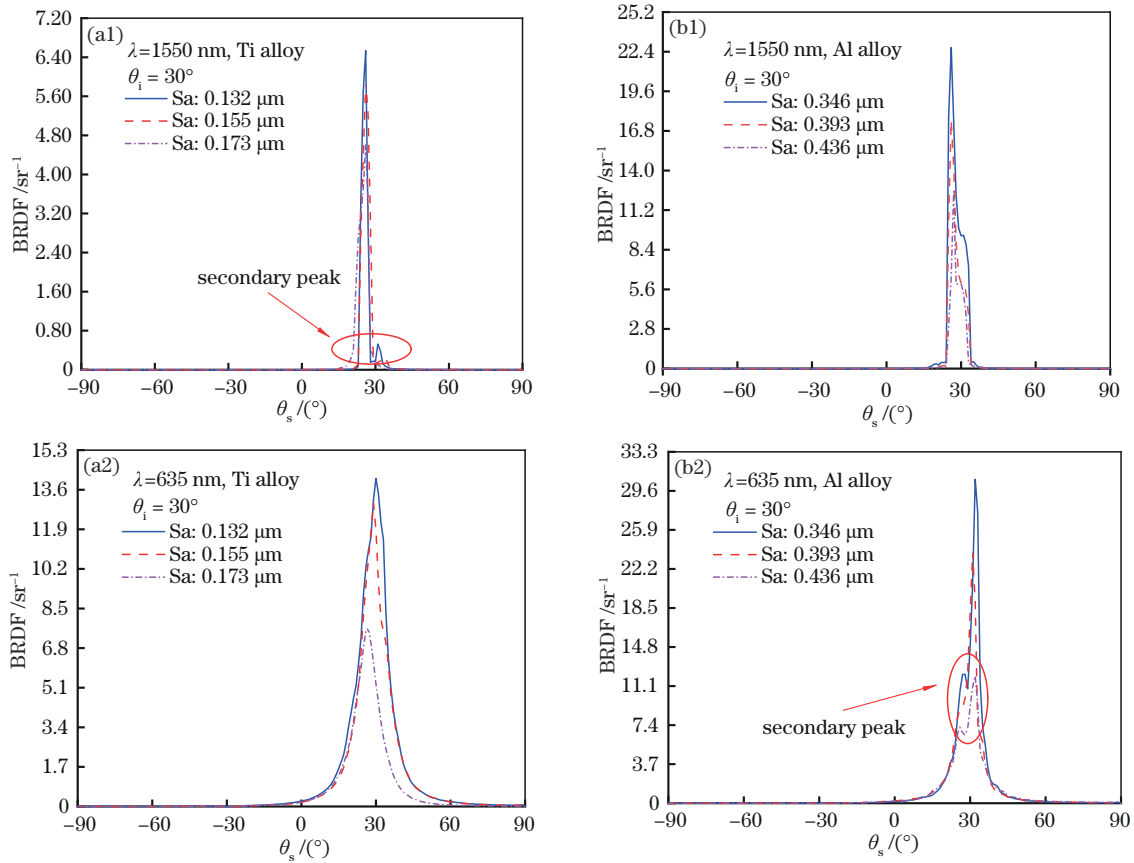


图 6 不同波长下结构件表面的 BRDF 分布。(a) 钛合金; (b) 铝合金

Fig. 6 BRDF distributions on the surface of structural parts at different wavelengths. (a) Ti alloy; (b) Al alloy

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{f_{\text{model}} - f_{\text{measure}}}{f_{\text{measure}}} \right)^2} \quad (16)$$

采用相对均方根误差 (RMSE) 计算仿真数据与实际测量值之间的相对偏离程度, 模型拟合参数和相对 RMSE 如图 2 所示。图 7 为结构件表面 BRDF

模型计算结果与实验测量的 BRDF。可以发现, 模型计算结果与实测值吻合较好, 但也存在一定的误差。最大拟合误差为 7.26%, 这表明 BRDF 建模与实测值的符合度较高, 建立的 BRDF 模型能准确完整地表征钛合金、铝合金结构件表面的 BRDF 散射特性。

表 2 金属结构件表面的 BRDF 建模参数

Table 2 BRDF modeling parameters of metal structure surface

Material	Roughness / μm	BRDF modeling parameter				$\delta / \%$
		k	ξ	a	b	
Ti alloy 1	0.132	2.4536	0.1843	0.1782	0.6827	6.04
Ti alloy 2	0.155	2.3252	0.0972	0.0917	0.7923	4.83
Ti alloy 3	0.173	2.9821	0.0277	0.1548	0.7417	5.82
Al alloy 1	0.346	2.2343	0.0712	0.2192	0.6123	7.04
Al alloy 2	0.393	2.1236	0.1723	0.1944	0.4296	5.85
Al alloy 3	0.436	2.7191	0.1097	0.2413	0.5530	7.26

图 8 为 ABg 模型的拟合结果, 对应的参数如表 3 所示。可以发现, 总散射率 A 随粗糙度的增大而增大, 这表明小粗糙度的结构件表面对于杂散光的抑制效果较好。此外, 钛合金 1 的拟合曲线位于最下方, 拐点较钛合金 2 和钛合金 3 提前, 这表明钛合金 1 对于杂散光抑制效果是 6 个样件中最好的。对比钛合金和铝合金

的拟合曲线可以发现, 钛合金相比铝合金有更好的杂散光抑制效果。实验研究的钛合金、铝合金表面粗糙度位于同一量级, 但钛合金的 A 值均高于铝合金 1 个量级。这表明钛合金相比铝合金有更好的杂散光抑制效果。

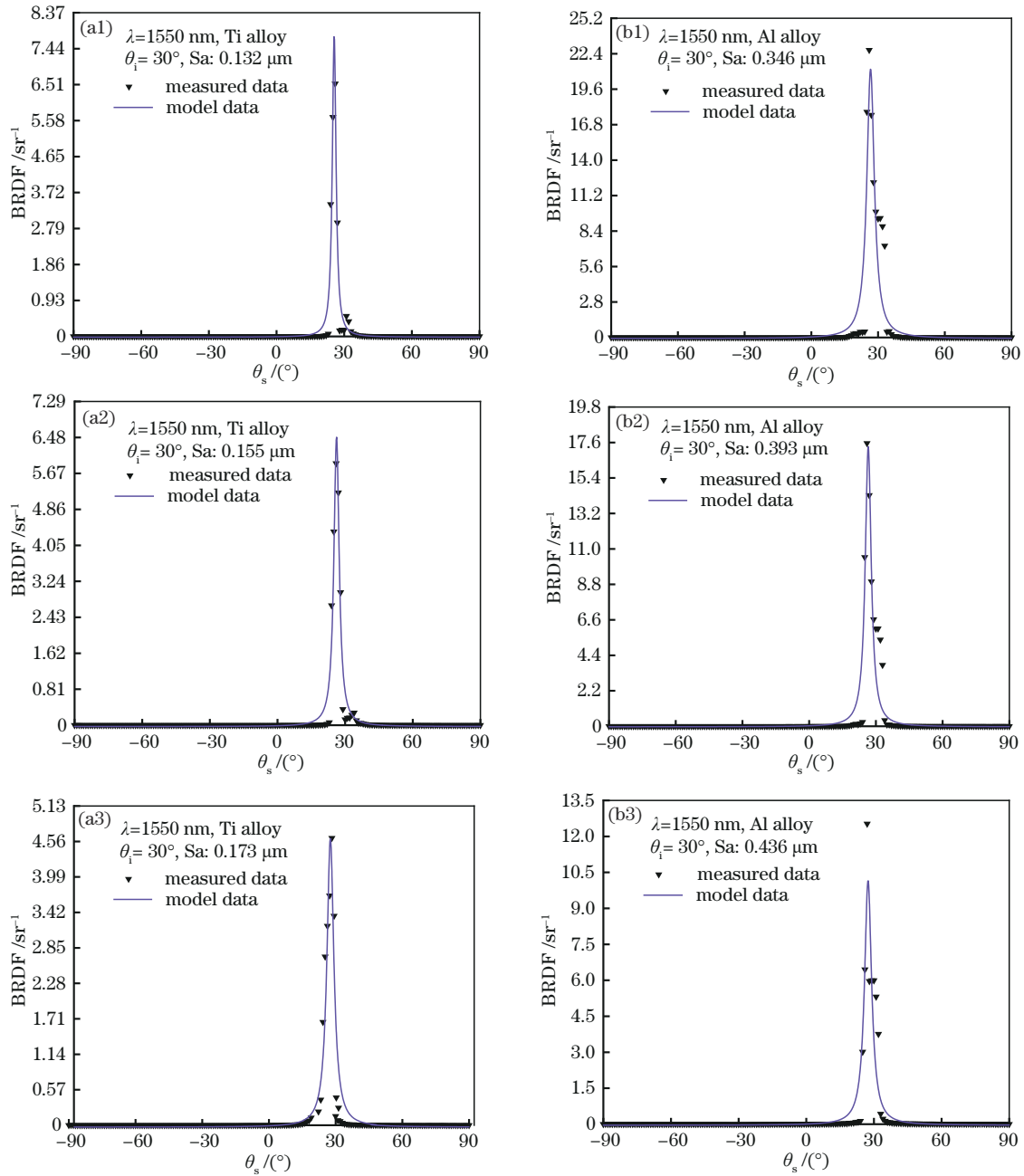


图 7 结构件 BRDF 模型的仿真与实测数据。(a) 钛合金; (b) 铝合金

Fig. 7 Simulation and measured data of the BRDF model of the structure. (a) Ti alloy; (b) Al alloy

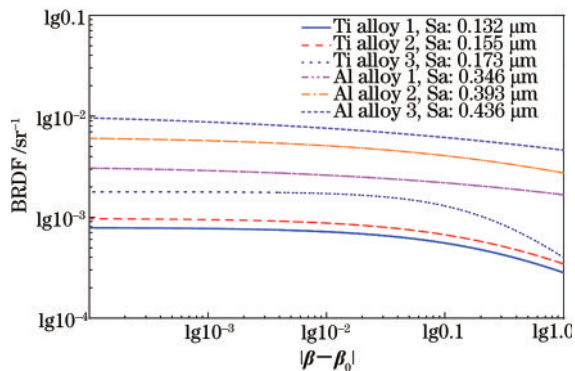


图 8 结构件表面 ABg 模型拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of ABg scattering model of structure

表 3 结构件参数的拟合结果

Table 3 Fitting results of structural parameters

Material characteristics		Scattering model parameters		
Material	Roughness / μm	A	B	g
Ti alloy 1	0.132	0.000441	0.5541	0.6258
Ti alloy 2	0.155	0.000535	0.5471	0.6054
Ti alloy 3	0.173	0.000513	0.2856	0.9607
Al alloy 1	0.346	0.003414	0.7726	0.3728
Al alloy 2	0.393	0.004886	1.0370	0.2886
Al alloy 3	0.436	0.007989	0.7233	0.2460

5 结 论

本文针对卫星光通信系统中钛合金和铝合金结构件表面散射特性展开研究,设计搭建了不确定度优于 4.61% 的 BRDF 测量系统,并测量分析了结构件表面在入射角度、激光波长、粗糙度等因素下的 BRDF 分布。结果表明:由于遮蔽效应的发生,BRDF 在大角度入射时会随着入射角的增大而显著增加,且粗糙度越大这种现象越明显;同等条件下,钛合金对杂散光的抑制优于铝合金 1 个量级。本文建立了考虑遮蔽效应影响的结构件表面 BRDF 模型,采用 SA 算法对实测数据拟合求得最优参数,模型与实测值拟合误差优于 7.26%,验证了该模型的可行性,为实际工程应用中的杂散光追迹计算和系统设计提供必要的的数据支撑。

参 考 文 献

- [1] 姜会林,安岩,张雅琳,等.空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J].飞行器测控学报,2015,34(3):207-217.
Jiang H L, An Y, Zhang Y L, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207-217.
- [2] 付强,姜会林,王晓曼,等.空间激光通信研究现状及发展趋势[J].中国光学,2012,5(2):116-125.
Fu Q, Jiang H L, Wang X M, et al. Research status and development trend of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 116-125.
- [3] 陈醒,胡春晖,颜昌翔,等.大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J].中国光学,2019,12(3):678-685.
Chen X, Hu C H, Yan C X, et al. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 678-685.
- [4] Barilli M, Mazzoni A. An equipment for measuring 3D bi-directional scattering distribution function of black painted and differently machined surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5962: 59620L.
- [5] Pompea S M, Pfisterer R N, Morgan J S. Stray light analysis of the Apache Point Observatory 3.5-meter telescope system[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4842: 128-138.
- [6] Balasubramanian K, Shaklan S, Give'on A. Stellar coronagraph performance impact due to particulate contamination and scatter[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7440: 74400T.
- [7] 李永强,郭永祥,廖志波,等.空间相机用铝合金不同工艺表面双向反射分布函数的特性对比[J].光学学报,2013,33(5):0512003.
Li Y Q, Guo Y X, Liao Z B, et al. Comparison of bidirectional reflectance distribution function of aluminum alloy with different processing technologies in space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0512003.
- [8] 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.
- [9] 闫佩佩.低轨对地观测双波段一体化光学系统杂散辐射抑制研究[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2019:20-28.
Yan P P. Research on stray radiation suppression of dual band integrative optical system used to low-orbit spaceborne earth observation[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 20-28.
- [10] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. Applied optics, 1965, 4(7): 767-775.
- [11] Tian S Z, Shuai Y, Guo Y M, et al. Simple and fast approach to exploit the spectral reflection properties of liquid media[J]. Applied Optics, 2018, 57(30): 9046-9052.
- [12] Diner D, Xu F, Martonchik J, et al. Exploration of a polarized surface bidirectional reflectance model using the ground-based multiangle Spectro Polarimetric imager[J]. Atmosphere, 2012, 3(4): 591-619.
- [13] 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.
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.
- [14] 王鹏,袁鹏,谭伟强,等.汤姆孙散射系统中发黑材料的表面散射特性测量[J].光学学报,2020,40(21):2129002.
Wang P, Yuan P, Tan W Q, et al. Measurement of surface scattering characteristics of black materials in Thomson scattering system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2129002.
- [15] 闫爱民,周煜,孙建锋,等.卫星激光通信复合轴光跟踪技术及发展[J].激光与光电子学进展,2010,47(4):040601.
Yan A M, Zhou Y, Sun J F, et al. Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 040601.
- [16] Xie Y M, Tan J Y, Jing L, et al. Investigating directional reflection characteristics of anisotropic machined surfaces using a self-designed scatterometer[J]. Applied Optics, 2019, 58(29): 7970-7980.
- [17] 黄凡,张旭坤,孙陆,等.基于遗传算法和模拟退火算法的振动光谱成分分析算法[J].激光与光电子学进展,2020,57(9):093001.
Huang F, Zhang X K, Sun L, et al. Vibration spectral component analysis based on genetic algorithm and simulated annealing algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093001.