

### 关键参数先验的车载雷达镜头杂散光抑制模型研究

张丽芝 陆秋萍 段帆琳 戴幸 乔大勇

#### Stray light suppression model of vehicle LiDAR lens based on key parameter priors

ZHANG Li-zhi, LU Qiu-ping, DUAN Fan-lin, DAI Xing, QIAO Da-yong

引用本文:

张丽芝, 陆秋萍, 段帆琳, 戴幸, 乔大勇. 关键参数先验的车载雷达镜头杂散光抑制模型研究[J]. *中国光学*, 2025, 18(6): 1399–1408. doi: 10.37188/CO.2025–0074

ZHANG Li-zhi, LU Qiu-ping, DUAN Fan-lin, DAI Xing, QIAO Da-yong. Stray light suppression model of vehicle LiDAR lens based on key parameter priors[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1399-1408. doi: 10.37188/CO.2025-0074

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0074>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 空间引力波探测前向杂散光测量和抑制

Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(5): 1081 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0251>

#### 拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展

Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using raman lidar

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 243 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0145>

#### $10^9$ 量级高灵敏度点源透射比测试设备研究

A  $10^9$ -order point source transmission test facility

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(2): 390 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0050>

#### 制冷型被动式消热差红外光学系统设计

Passive athermalization design of a cooled infrared optical system

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 853 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0205>

#### 数字微镜器件 (DMD) 杂散光特性测试方法及装置

Method and device for testing stray light characteristics of Digital Micro-mirror Device (DMD)

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(2): 339 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0132>

#### 偏振激光雷达增益比定标方法对比研究

Polarization lidar gain ratio calibration method: a comparison

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(3): 685 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0136>

文章编号 2097-1842(2025)06-1399-10

## 关键参数先验的车载雷达镜头杂散光抑制模型研究

张丽芝<sup>1,2</sup>, 陆秋萍<sup>2</sup>, 段帆琳<sup>2</sup>, 戴 幸<sup>2</sup>, 乔大勇<sup>1,3\*</sup>

(1. 西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西西安 710072;

2. 宁波永新光学股份有限公司, 浙江宁波 315048;

3. 西北工业大学宁波研究院, 浙江宁波 315103)

**摘要:** 杂散光干扰会导致车载激光雷达的信噪比降低、探测效率下降, 对此本文提出一种基于光谱功率密度函数和总积分散射的表面散射建模方法, 拟合了不同材料表面的双向反射分布函数(BRDF)。模型计算结果与实测 BRDF 数据高度吻合, 验证了该方法的有效性。基于此模型, 本文系统分析了车载激光雷达长焦接收镜头的杂散光来源及传播路径, 尤其关注机盒内壁、镜片边缘、隔圈表面散射等。根据仿真结果, 提出了多项杂光抑制措施, 如采用低散射材料结构件、镜片表面镀增透膜、透镜非工作区涂覆消光油墨等, 并且从光学设计、信号处理及工程优化等多维度评估了该激光雷达接收光学系统的杂光抑制水平。实验结果显示优化后系统杂散辐射水平显著降低, 成像视场外的点源透过率(PST)从  $1 \times 10^0$  降至  $1 \times 10^{-5}$ , 视场内 PST 从  $1 \times 10^2$  降至  $1 \times 10^{-1}$ , 杂散光与目标信号对比度控制在  $1 \times 10^{-4}$  以下。此外, 探测回波信号强度提升显著, 有效提高了激光雷达的探测性能。本研究为车载激光雷达的杂散光抑制提供了理论模型和实用解决方案, 对高灵敏度光学系统的设计与优化具有一定的参考价值。

**关键词:** 车载激光雷达; 长焦光学系统; 杂散光抑制; 点源透过率; 消光处理

中图分类号: 0439

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2025-0074

CSTR: 32171.14.CO.2025-0074

## Stray light suppression model of vehicle LiDAR lens based on key parameter priors

ZHANG Li-zhi<sup>1,2</sup>, LU Qiu-ping<sup>2</sup>, DUAN Fan-lin<sup>2</sup>, DAI Xing<sup>2</sup>, QIAO Da-yong<sup>1,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Ningbo Yongxin Optics Co. Ltd., Ningbo 315048, China;

3. Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, China)

\* Corresponding author, E-mail: dyqiao@nwpu.edu.cn

**Abstract:** Stray light interference in vehicular LiDAR systems can reduce the signal-to-noise ratio and degrade detection efficiency. To mitigate this issue, this paper proposed a surface scattering modeling method based on the spectral power density function and total integrated scattering, which fits the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) for various material surfaces. The model calculation results were

收稿日期: 2025-04-27; 修订日期: 2025-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. U21B2035, No. 62074128)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U21B2035, No. 62074128)

highly consistent with the measured BRDF data, verifying the effectiveness of the method. Based on this model, the study systematically analyzed the sources and propagation paths of stray light in the long-focal-length receiving optics of vehicular LiDAR, with specific attention to scattering from the housing's inner walls, lens edges, and spacer ring surfaces. According to the simulation results, we put forward a number of stray light suppression measures, such as using structural components made of low-scattering materials, coating anti-reflection films on lens surfaces, and applying light-absorbing ink to the non-optical areas of lenses, etc. Furthermore, from optical design, signal processing and engineering optimization, the stray light suppression level of this LiDAR receiving optical system was evaluated in multiple dimensions. The experiment results showed that the level of stray radiation in the optimized system was significantly reduced. The point source transmittance (PST) outside the imaging field of view was reduced from  $1 \times 10^0$  to  $1 \times 10^{-5}$ , the PST in the field of view was reduced from  $1 \times 10^2$  to  $1 \times 10^{-1}$ , and the stray light contrast with the target signal was controlled below  $1 \times 10^{-4}$ . Additionally, the intensity of the detected echo signal is significantly improved, thereby effectively enhancing the detection performance of the LiDAR. This study provides a theoretical model and practical solutions for stray light suppression in vehicle-mounted LiDAR, offering valuable references for the design and optimization of high-sensitivity optical systems.

**Key words:** vehicle-mounted LiDAR; telephoto optical system; stray light suppression; point source transmittance; anti-reflection treatment

## 1 引言

车载激光雷达作为一种主动探测技术,通过发射近红外激光并接收目标反射信号,可以为自动驾驶系统提供高精度的环境感知信息。然而,在实际应用中,外界环境光(如太阳光、车灯等)以及设备内部激光的杂散光干扰,会显著降低接收镜头的成像精度和信号对比度,甚至导致目标信号被噪声淹没,严重影响探测性能<sup>[1-3]</sup>。因此,有效抑制杂散光成为提升车载激光雷达可靠性的关键技术之一。

杂散光抑制的关键在于建立准确的光机系统散射模型。双向反射分布函数(BRDF)是表征物体表面散射特性的重要工具,通过测量材料表面BRDF,可以准确得到材料表面的散射情况<sup>[4]</sup>。但是完整测量BRDF面临诸多困难:测量设备需覆盖 $4\pi$ 立体角空间,且受光源稳定性、探测器灵敏度等因素制约<sup>[5-6]</sup>。通过在有限的特征BRDF测量数据上建模计算,可以弥补实验测量的不足,常用的光学表面建模分析方法有Harvey-Shack散射模型、Rayleigh-Rice矢量微扰模型、Beckmann-Kirchhoff理论模型等<sup>[7]</sup>。根据材料表面散射特性参数,如表面相关长度、均方高度、介电常数等可

得到该材料的理论散射模型,从而预测其表面BRDF,但是以上散射特性参数往往不易直接获得<sup>[8-9]</sup>。为此,科研人员们依据表面粗糙形貌与波长、表面散射特性的理论关系,通过测量材料表面粗糙度并经过一系列转换计算,间接获得散射模型参数,进而模拟材料表面BRDF<sup>[10]</sup>。上述方法通过粗糙度转换计算材料表面BRDF,这利用了一般光学表面的近似拟合。然而,实际光学表面的散射特性会因材料、加工方式和表面镀膜等因素而不同。因此,该方法得到的BRDF可能与实际材料表面的散射特性存在较大差异。

针对上述问题,本文提出了一种基于光谱功率密度(PSD)和总积分散射(TIS)的表面散射建模方法。该方法通过现有工程设备测量关键参数,建立了适用于不同光学件及结构件的散射模型。同时,模型计算结果与实测BRDF数据具有良好的 consistency,为杂散光仿真分析提供了可靠的理论基础。最后,基于所建立的散射模型,本文重点研究了4片式车载激光雷达长焦接收镜头的杂散光特性<sup>[11]</sup>。通过系统分析其杂散光来源及传播路径,提出了一种低成本、高效率的杂散光抑制方案。为高灵敏光学系统的设计与优化提供一定的参考。

## 2 材料表面散射模型的构建

散射模型的构建需要知道镜片的折射率、隔圈的反射率以及其它表面的散射特性, 这些特性可通过材料表面 PSD 和 TIS 等关键参数转化得到。所用到的测量仪器分别为中图 SuperView W1 光学 3D 表面轮廓仪, Z 向分辨率为 0.1 nm, 粗糙度 RMS 重复性为 0.005 nm; 日立 HITACHI 的 UH4150 分光光度计, 波长范围为 240~2600 nm; 全欧 ImageMaster@HR 图像质量测量仪, 测量波长范围为 450~1000 nm, 位置精度为 $\pm 0.1^\circ$ 。

### 2.1 光学表面 BRDF 模型构建

光学表面的散射特性一般可用 BRDF 表示, PSD 描述了表面粗糙度引起的散射现象, PSD 与 BRDF 的关系可由公式 (1) 决定<sup>[12]</sup>:

$$BRDF = \frac{4\pi^2 \cdot \Delta n^2 \cdot Q}{\lambda^4} \cdot PSD \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $\Delta n$  为散射面两侧折射率的差值,  $Q$  为偏振因子, 是一个关于介电常数、入射光散射光偏振态的复杂函数, 在一些场景下可近似为镜面反射率。通常, 对于大多数光学表面的 PSD 可以使用 K 相关模型来表征<sup>[12]</sup>:

$$PSD(f) = A_K [1 + (B_K f)^2]^{-C_K/2} \quad (2)$$

其中,  $f$  为空间频率,  $A_K$  为低频时的光谱功率密度,  $1/B_K$  为 K 相关模型曲线发生滚降时的空间频率,  $C_K$  为曲线滚降中的斜率。将一片光学镜片放在白光干涉 3D 轮廓仪上, 测试得到标准格式下的 PSD 数据, 如图 1(彩图见期刊电子版) 中的散点分布。

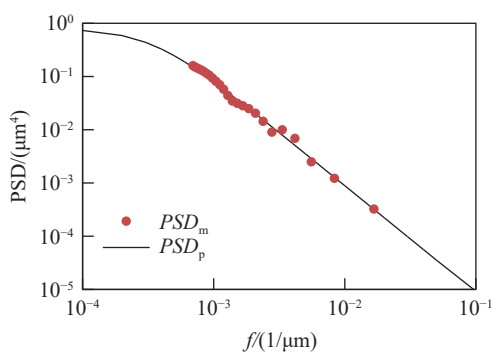


图1 PSD 拟合结果

Fig. 1 PSD fitting results

本文将光学件表面的 PSD 曲线直接应用于模型构建, 为了获得更完整的频段, 选择尽可能长

的取样范围, 空间频率范围为  $0.0001 \sim 0.08 \mu\text{m}^{-1}$ ; 结构件表面的 PSD 曲线可以直接测量获得, 空间频率范围为  $0.003 \sim 0.08 \mu\text{m}^{-1}$ 。

将模型值与测量值的最小均方根误差作为目标函数, 确定模型参数<sup>[4]</sup>:

$$\delta_{\min} = \min \sum \frac{[PSD_p - PSD_m]^2}{\sum [PSD_m]^2} \quad (3)$$

其中,  $PSD_p$  为模型预测值,  $PSD_m$  为测量值。根据公式 (3) 对  $A_K$ 、 $B_K$ 、 $C_K$  三个参数赋值拟合, 得到拟合结果, 即图 1 中的实线。可见, 测量数据与模型拟合趋势较吻合。在 PSD 拟合中, 选择相对均方根误差计算测量数据与预测值之间的相对偏离程度。由于 PSD 数据在几个数量级的范围内变化, 因此使用对数计算相对均方根误差:

$$\delta_{\text{rel}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left[ \frac{\log_{10}(PSD_p) - \log_{10}(PSD_m)}{\log_{10}(PSD_m)} \right]^2} \quad (4)$$

由式 (4) 可得光学件的相对均方根误差为 4.2%。同时, 使用白光干涉 3D 轮廓仪测得光学镜片表面粗糙度为 1.04 nm。在粗糙度远小于波长条件的前提下, K 相关模型可通过参数化表示为三参数 Harvey-Shack 模型:

$$BRDF = b_0 \left[ 1 + \left( \frac{|\sin \theta_s - \sin \theta_i|}{l} \right)^2 \right]^{s/2} \quad (5)$$

其中,  $b_0$ 、 $l$ 、 $s$  为特定参数,  $\theta_s$  为散射角,  $\theta_i$  为入射角。两种模型的共同点在于使用三个参数来近似表示表面曲线的走势:

$$\begin{cases} b_0 = \frac{4\pi^2 \cdot \Delta n^2 \cdot Q \cdot A_K}{\lambda^4} \\ l = \frac{\lambda}{B_K} \\ s = -C_K \end{cases} \quad (6)$$

经过三参数 Harvey-Shack 模型的过渡, K 相关模型最终可转换为 ABg 模型, ABg 模型是一个常用的描述材料表面 BRDF 特性的散射模型, 应用于大部分的仿真软件中, 其表达式为<sup>[13]</sup>:

$$BRDF = \frac{A}{B + |\sin \theta_s - \sin \theta_i|^g} \quad (7)$$

其中,  $A$ 、 $B$ 、 $g$  为特定参数。A 与镜面反射相关, 决定散射能量大小, B 和 g 决定散射分布情况, 可通过 Harvey-Shack 模型的参数转换得到:

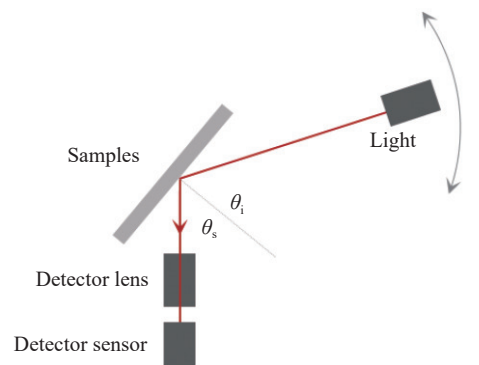
$$\begin{cases} B = l^{-s} \\ g = -s \\ A = b_0 B \end{cases} \quad (8)$$

根据上述公式,最终推导得到:

$$\begin{cases} B = \left(\frac{\lambda}{B_K}\right)^{C_K} \\ g = C_K \\ A = \frac{4\pi^2 \cdot \Delta n^2 \cdot Q \cdot A_K}{\lambda^4} \cdot B \end{cases} \quad (9)$$

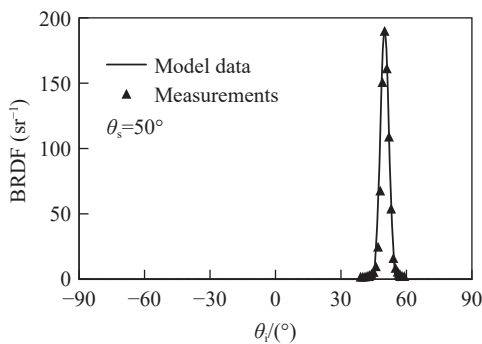
根据公式(9),最终计算得到 $A$ 、 $B$ 、 $g$ 三个参数分别为 $1.7 \times 10^{-5}$ 、 $9.1 \times 10^{-8}$ 、2,符合光学表面常用范围(光滑面 $B$ 在 $0 \sim 0.001$ 以内,光滑面 $g$ 在 $1 \sim 3$ 以内)<sup>[14]</sup>。

得到镜片表面的散射模型后,通过测量其镜片表面的实际散射数据来验证上述模型的准确性。将镜片放在图像质量测量仪 ImageMaster<sup>®</sup>HR 上,如图 2(a) 所示。



(a) 测量示意图

(a) Schematic diagram of measurement



(b) 拟合结果

(b) Fitting result

图 2 镜片 BRDF 测量与拟合结果

Fig. 2 Measurement and fitting results of lens BRDF

由图 2(a) 可知,光源光束被镜片反射后,通过接收镜头进入芯片。光源随摆臂转动,得到不同的光线入射角。样品镜片放置在测量仪的测量中心,确保不同角度的入射光到达镜片的同一位置。接收镜头通过限制光束视场范围来模拟亮度

计。如图 2(b) 所示,模型仿真结果与实测值的趋势吻合较好。

## 2.2 结构件表面 BRDF 模型构建

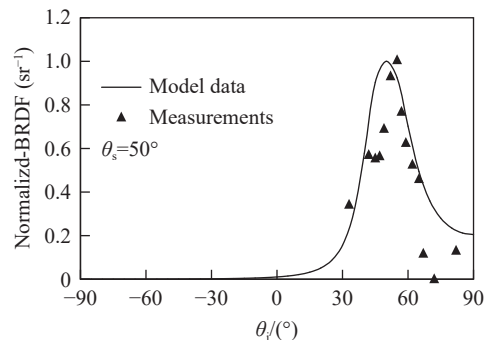
除光学表面外,实际光机系统还包含多种具有复杂形貌的结构表面。相较于光学表面,黑化处理的结构件表面具有更高的粗糙度特征复杂度。其表面微观形貌中的凹陷与凸起结构会导致反射光相关数值发生显著变化,使得实际散射特性偏离理论模型预测结果。仅依靠 PSD 分析方法难以准确预测此类表面的散射特性。尽管如此,针对  $\sigma > \lambda$  的粗糙表面,利用粗糙面特性和实测值来多次修正模型,可使仿真模型的分析精度提高 2~3 个数量级<sup>[15]</sup>。同时,通过加入比率  $S$  可减小几何光学模型和物理光学模型的差异点<sup>[16]</sup>,再结合 TIS 数据即能实现对结构件表面散射模型的构建。

TIS 是半球空间内 BRDF 对立体角的积分,光线正入射时, TIS 取最大值,可将该值代替各位位置实际 TIS 来分析系统杂光抑制水平<sup>[17]</sup>。首先通过测量并拟合 PSD 曲线,考虑粗糙度数据,将粗糙表面的粗糙度 RMS 加入模型,得到  $B'_K$  参数,并进一步得到  $B'$  参数:

$$\begin{cases} B'_K = B_K / RMS \times 100 \\ B' = (\lambda / B'_K)^{C_K} \end{cases} \quad (10)$$

其次,计算相应的  $g$  参数。最后,使用分光光度计测量得到结构件表面的反射率和散射特征,通过仿真软件得出  $A'$  参数。经过修正后的模型使用  $A'$ 、 $B'$ 、 $g$  参数。

选取 4 种经过不同工艺处理的结构件,分别记为工艺 1 号 (process 1)、工艺 2 号 (process 2)、工艺 3 号 (process 3)、工艺 4 号 (process 4),它们的 PSD 数据拟合误差分别为 0.9%、1.3%、2.0% 和 3.7%。如图 3 所示,通过修正模型得到的 BRDF 曲线与实测值的趋势基本一致。



(a) 工艺 1 号

(a) Process 1

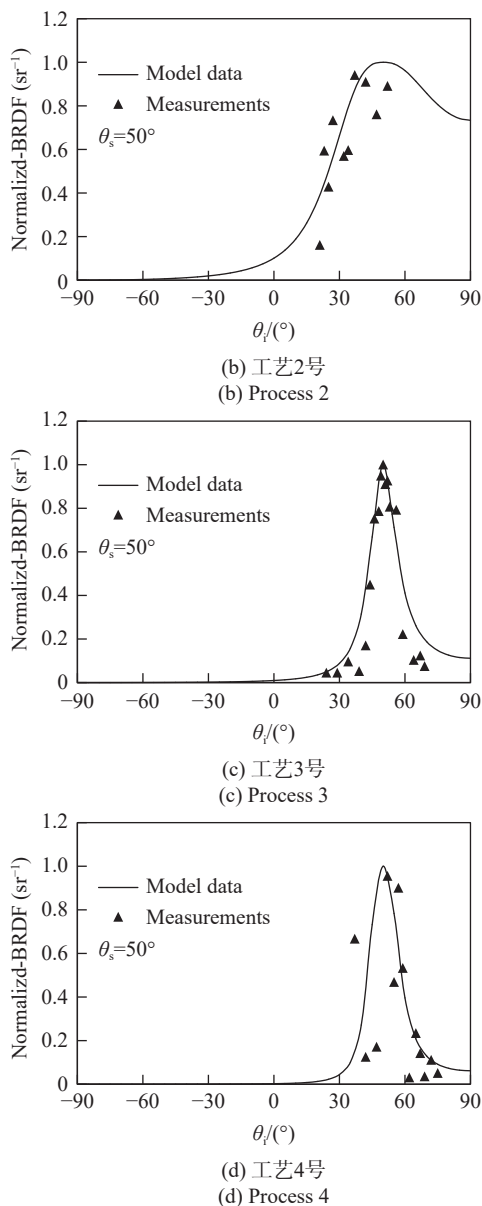


图 3 不同结构件 BRDF 拟合结果

Fig. 3 Fitting results of BRDF for different structural components

### 3 长焦接收镜头杂散光模拟分析

#### 3.1 激光雷达及接收镜头内部构成

图 4(彩图见期刊电子版)为激光雷达整机的内部构成。光源使用脉冲宽度最大为 100 ns、输出功率为 0.24 W 的半导体激光器,探测器使用峰值响应波段为 905 nm、感光面直径为 3.6 mm 的 1×16 阵列探测器。激光器发出的光束依次经过准直镜头、反射镜 1、窗口后到达目标物,部分光线被窗口反射后在盒体内部散射成为杂散光,此时杂光光源为内部激光。返回光束依次经过反射

镜 2、接收镜头后到达探测器,其中部分光线在盒体内部散射、部分光线在接收镜头内部散射,经过非指定路径被探测器接收。此时的杂光光源有:外界无效光源对目标物体复杂形状的照射所引起的散射光,以及激光雷达设备内部的激光散射光线等。

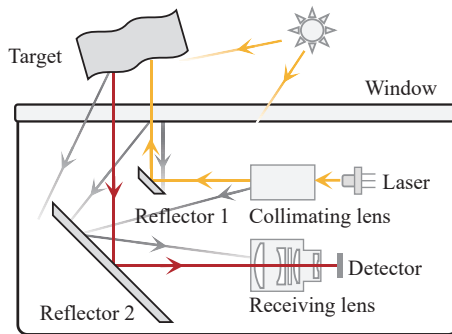


图 4 激光雷达整机结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the overall structure of LiDAR

该长焦接收镜头的最大半视场角为 0.425°,对应的最大半像高为 1.761 mm。如图 5 所示,光学系统中包含具有光焦度的镜片 G1、G2、G4、G5,以及不具有光焦度的滤光片 G3。所有光学镜片通过镜筒 H1 和隔圈(B1、B2、B3、B4、B5)固定在镜头内部。

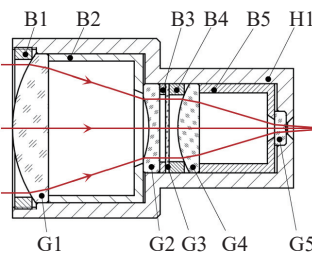


图 5 镜头结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lens structure

#### 3.2 长焦接收镜头的光路分析

本文使用光学软件 TracePro 进行散射模型的构建,通过定义光机系统各表面的散射特性,可得到一个基于实际数据的长焦接收镜头模型,进而得到定量分析结果。如前所述,杂光光源来源有多种,并非所有光线都可进入接收镜头被探测器记录<sup>[18]</sup>。本文从激光雷达整机出发,逐步分析杂光来源与路径。

##### 3.2.1 机盒内杂光来源分析

光机系统初始散射模型#1为:结构件表面涂黑色消光漆,参数如下:吸收率为 90%、反射率为

5.03%、散射率为 4.97%,  $A=3.18 \times 10^{-3}$ 、 $B=0.007$ 、 $g=2$ 。镜头光学件表面做普通镀膜处理, 参数如下: 吸收率为 0.1%、透射率为 97%、反射率为 2.8%、散射率为 0.1%,  $A=1.7 \times 10^{-5}$ 、 $B=9.1 \times 10^{-8}$ 、 $g=2$ 。为了分析机盒内光线数量, 考虑视窗表面反射, 参数如下: 透射率为 95%、反射率为 5%。分析时假定激光雷达的视窗正对目标物体。

本文选择 3 个表面作为接收面分析光线走向及路径: 视窗表面、第一个镜片 G1 的表面、探测器表面, 如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。由图 6(a) 可知, 目标物体的反射光线到达视窗表面时光线数量多; 图 6(b) 中经过镜片 G1 的光线数减少、能量减小, 照度普遍在  $100 \text{ W/m}^2$  左右; 图 6(c) 中到达探测面的光线最少, 但经接收镜头汇聚成像后, 照度值升至  $1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  左右。

随后, 根据接收表面分析光线传播路径, 结果如表 1 所示。按指定路径从视窗出射的光束 (序号 1) 光通量远大于从外界返回视窗的光束的光通量 (序号 2); 按指定路径到达 G1 表面的光束 (序号 3) 光通量与未经过物体仅在机盒内部反射的光束 (序号 4、5) 接近。这说明机盒内部的反射造成了较大的能量损失。最终到达探测器表面的光束大多经过了指定路径 (序号 6), 但是有少部分光线会经过 G5 镜片的非工作区 (序号 7), 从而对激光雷达的成像探测造成干扰。

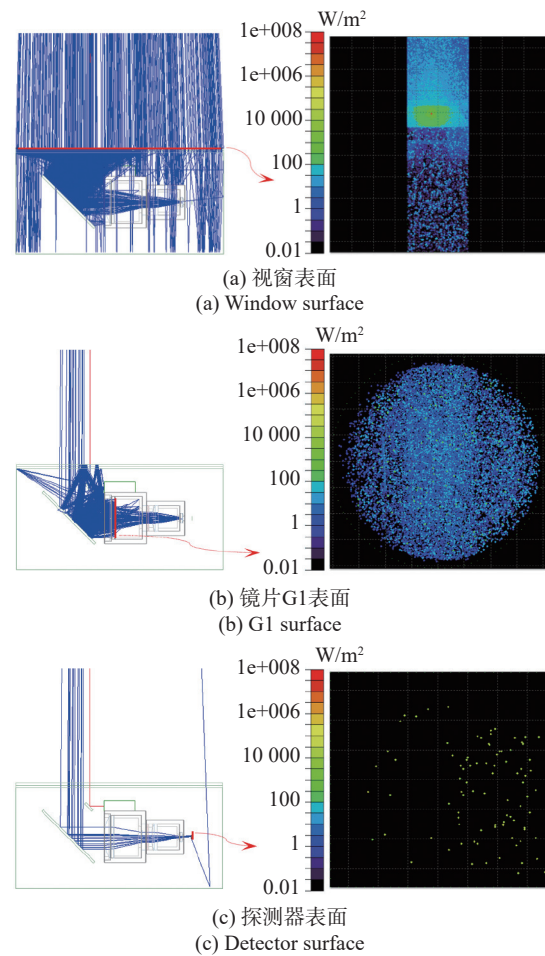


图 6 机盒内光线路径及不同表面的辐照度

Fig. 6 Light path in the box and irradiance map on different surfaces

表 1 机盒内主要光线路径

Tab. 1 Primary ray propagation paths within housing

序号	光线路径	入射光通量与光源之比/%	在其接收面的占比/%	光线数/根
1	光源-反射镜1-视窗	94.9240	98.90	119401
2	光源-反射镜1-视窗-目标-视窗	0.0426	0.01	1129
3	光源-反射镜1-视窗-目标-视窗-反射镜2-G1	0.0035	29.75	107
4	光源-反射镜1-视窗-反射镜1-光源-反射镜2-G1	0.0027	22.54	1326
5	光源-反射镜1-视窗内部反射-反射镜1-光源-反射镜2-G1	0.0024	20.56	1342
6	光源-反射镜1-视窗-目标-视窗-反射镜2-G1-G2-G3-G4-G5-探测器	0.0019	86.44	77
7	光源-反射镜1-视窗-目标-视窗-反射镜2-G1-G2-G3-G4-G5非工作区-探测器	0.0003	13.47	12

从上述分析可知, 为了提高激光能量利用率、降低能量损耗, 应提高窗体对出射光束的透过率、降低机盒内部表面的反射率。为了提升激光雷达的探测精度, 增加进入镜头的光线数量, 需

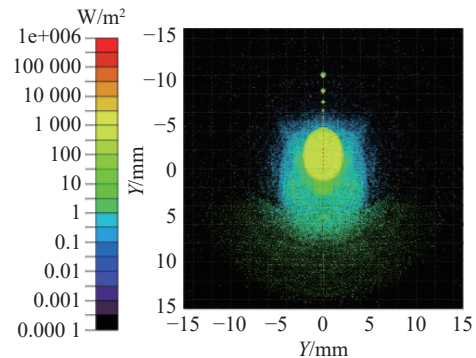
提高镜片的透过率。同时为了避免成像干扰, 应降低 G5 镜片非工作区的透过率。

### 3.2.2 接收镜头内杂光分析

为了进一步分析镜头内部光线传播路径, 本

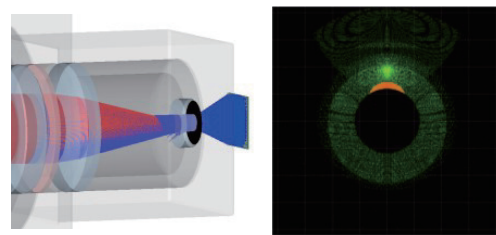
文设置入射光源全口径入射镜头、像面面积大于探测器有效像面,以便较全面分析系统杂散光分布。设置光源的角度分布为 $0^\circ\sim 89^\circ$ ,视场中心步长为 $0.1^\circ$ 、由中心向边缘步长逐渐增大到 $10^\circ$ ,总功率为 $0.24\text{ W}$ 。得到的像面照度分布如图7(a)(彩图见期刊电子版)所示,目标光主像依次排列,与入射光源角度相对应。当入射角越大,光斑越弥散,当入射角超过 $1.5^\circ$ 时,主像光斑消失。当入射角较小时,杂散光光斑围绕主像光斑,在有效像面内的照度较大,与主像照度之比仅差3个数量级,会对成像造成干扰。

表2为镜头内的主要光线路径。从表2可看出,部分光线存在经G5和G2非工作区(序号2、4、5)、隔圈反射(序号3)、镜片间反射(序号6)等多种情况。其中光线经镜片非工作区到达像面的情况如图7(b)(彩图见期刊电子版)所示。根据仿真结果,细致分析杂光来源及传播路径,可以确认光机系统的多个重要表面,以便后续采取针对性的措施,有利于实现杂散光的有效抑制。



(a) 多光源下的像面照度图

(a) The irradiance map under multiple source



(b) 镜片非工作区

(b) The non-optical area of the lens G5

图7 镜头内杂光分析

Fig. 7 Stray light analysis in the lens

表2 镜头内主要光线路径

Tab. 2 Primary ray propagation paths within lens

序号	光线路径	入射光通量与光源之比/%	在接收面的占比/%	光线数/根
1	目标-G1-G2-G3-G4-G5-探测器	11.3395	68.3153	17924
2	目标-G1-G2-G3-G4-G5非工作区-探测器	3.9552	23.8282	6252
3	目标-G1-G2-G3-G4-B5-G5-探测器	0.0602	0.3627	1910
4	目标-G1-G2非工作区-G3-G4-G5非工作区-探测器	0.0112	0.0673	18
5	目标-G1-G2非工作区-G3-G4-G5-探测器	0.0099	0.0599	16
6	目标-G1-G2-G3S1-G2S2-G3-G4-G5-探测器	0.0077	0.0464	16535
7	目标-G1-G2-G3-G4-G5非工作区-H1-探测器	0.0075	0.0450	236
8	目标-G1-G2-G3内部反射一次-G4-G5-探测器	0.0074	0.0448	15974
9	目标-G1-G2-G3S2-G2S2-G3-G4-G5-探测器	0.0069	0.0417	15792

### 3.3 长焦镜头杂光抑制方案设计

根据上述分析结果,本文采用的措施分别为:吸光性更好的黑漆喷涂件,吸收率为 $96.1\%$ 、反射率为 $0.5\%$ 、散射率为 $3.4\%$ , $A=3.02\times 10^{-3}$ 、 $B=0.064$ 、 $g=2.6$ ;透过率更高的增透膜,吸收率为 $0.1\%$ 、透过率为 $99.4\%$ 、反射率为 $0.4\%$ 、散射率为 $0.1\%$ , $A=1.7\times 10^{-5}$ 、 $B=9.1\times 10^{-8}$ 、 $g=2$ ;G5非工作区涂墨,表面参数与结构件表面相同;隔圈B2和B5内

侧做消光螺纹结构,用以增强散射和吸收面积,达到消减杂光能量的抑制效果。设计的方案如表3所示。

带入表3方案对应的散射模型参数进行杂散光仿真,分析得到了如图8所示的点源透过率(PST)曲线。PST通常用于分析光学系统杂散光抑制前后的杂散辐射水平<sup>[9]</sup>,其定义为光学系统像面接收的杂光辐照度 $E_2$ 与光学系统第一光学

面接收的辐照度  $E_1$  之比。

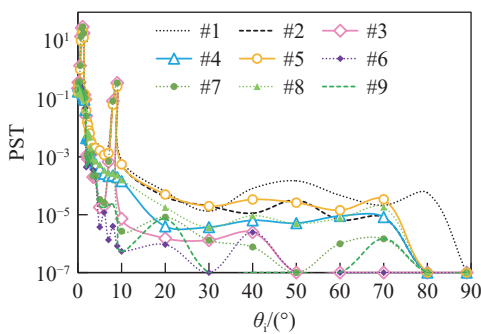
$$PST = \frac{E_2}{E_1} \quad (11)$$

此外, 根据工程经验当杂散光与目标像照度之比在  $10 \times 10^{-4}$  以下时, 对成像对比度几乎无影响, 可以满足实际使用需求<sup>[20]</sup>。

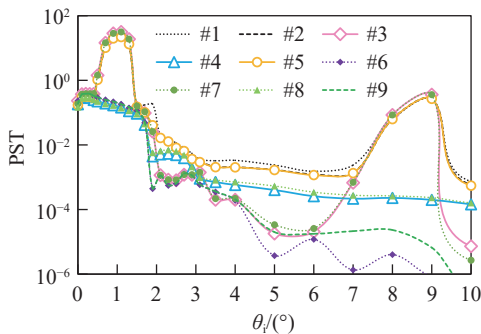
表 3 分析与抑制方案设计

Tab. 3 Design of analysis and suppression solutions

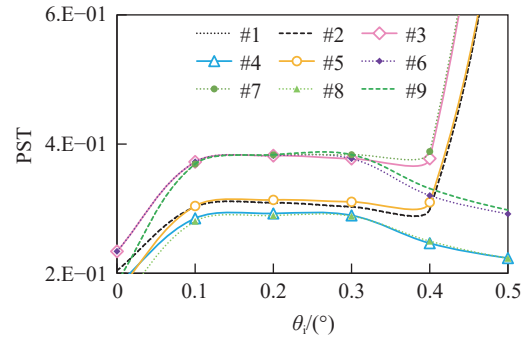
方案 序号	结构件表面		光学件表面		其它	
	黑漆	黑漆喷涂	普通镀膜	增透膜	镜片非工作区 涂墨	消光螺纹
#1	√	-	√	-	-	-
#2	-	√	√	-	-	-
#3	-	√	-	√	-	-
#4	-	√	√	-	√	-
#5	-	√	√	-	-	√
#6	-	√	-	√	√	-
#7	-	√	-	√	-	√
#8	-	√	√	-	√	√
#9	-	√	-	√	√	√



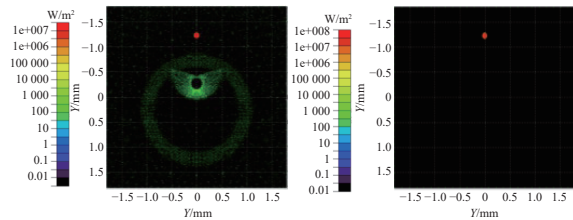
(a) 全视场范围内  
(a) All field of view



(b) 入射角 10° 以内  
(b)  $\theta_i < 10^\circ$



(c) 入射角 0.6° 以内  
(c)  $\theta_i < 0.6^\circ$



(d) 0.3° 入射时的消光前(左)、后(右)对比结果  
(d) Effect comparison before (left) and after (right) extinction at 0.3° incidence

图 8 不同抑制方案的效果

Fig. 8 Results of different plans

不同抑制方案效果如图 8(彩图见期刊电子版) 所示。从图 8(a) 可以看出, 光源入射角大于  $10^\circ$  时, 不同抑制措施下光机系统 PST 较平稳, 均小于  $1 \times 10^{-3}$ 。当光源入射角在  $1^\circ$  和  $9^\circ$  时, 通过对 G2 和 G5 非工作区进行涂墨(方案 #4、#6、#8、#9), 系统 PST 较方案 #1 明显降低。当光源入射角小于  $9^\circ$  时, 在镜片表面镀增透膜后(方案 #3、#6、#7、#9), 系统 PST 水平下降了 2 个数量级, 如图 8(b) 所示。图 8(c) 中, 光源入射角在镜头成像视场内 ( $0.425^\circ$ ) 时, 各消光方案效果接近。图 8(d) 展示了方案 #1 和 #9 在  $0.3^\circ$  下的像面辐照度对比, 从图中可知经过消光措施后, 杂光与目标光束的照度对比小于  $10 \times 10^{-4}$ , 符合工程经验中的消光效果。

### 3.4 长焦镜头的信号接收

所搭建的测试平台如图 9(a) 所示, 使用脉冲宽度最大为 100 ns、输出功率为 0.24 W 的半导体激光器 (VCSEL) 作为光源, 并在光源内部配置准直镜头。长焦镜头靠近光源放置。在光线发射方向放置白板, 用于观测镜头接收信号的强弱。探测器固定在接收镜头后方, 确保外界光线不直接进入。探测器与激光器一同连接至示波器。

发射和接收信号如图 9(b)(彩图见期刊电子

版)所示,其中TX曲线表示发射波信号,RX-before和RX-after曲线分别表示经消光处理前后的接收镜头到达示波器的回波信号。根据示波器信号显示,发射信号发出后,未经过消光处理的镜头接收的信号强度约为经过消光处理镜头的一半,同时无信号的杂波段,电信号减弱。可以推测,在实际探测时,该长焦接收镜头的探测效率可得到有效提升。

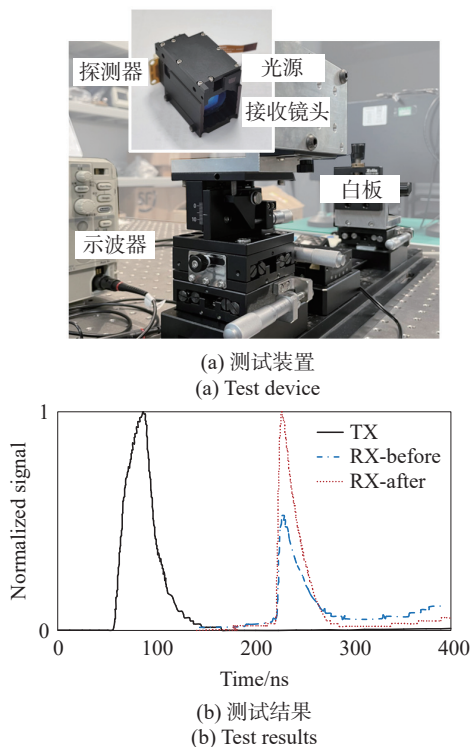


图9 镜头信号接收实验

Fig. 9 Lens signal reception experiment

## 4 结论

本文基于材料表面光谱功率密度和总积分散射等关键参数,建立了适用于不同光学表面及结构件的表面散射模型,并通过对比模型计算的BRDF与实测数据验证了该模型的准确性。本文将该散射分析方法应用于车载激光雷达长焦接收镜头的杂散光研究中,系统分析了机盒及镜头内部的光线传播路径,揭示了小视场角镜头杂散光的主要来源,即镜片高反射率导致的光学系统内多次反射现象,尤其是大角度入射光经镜片非工作区到达像面形成杂散光。针对上述问题,本文提出了三种优化措施:(1)镜片表面镀制增透膜以减少反射;(2)镜片非工作区涂覆消光油墨以吸收杂散光;(3)优化结构件表面特性以降低散射。实验结果表明,优化后光机系统的杂散光水平显著降低:成像视场外的PST从 $1 \times 10^0$ 降至 $1 \times 10^{-5}$ ,成像视场内从 $1 \times 10^2$ 降至 $1 \times 10^{-1}$ ,杂散光与目标光照度对比控制在 $10 \times 10^{-4}$ 以下。实测数据进一步证实,优化后系统的信号杂波减少,接收信号对比度提升,有效提高了激光雷达的探测效率,可为其他光机系统的设计与优化提供参考。

本文利用常规工程设备(光学3D表面轮廓仪和分光光度计)直接测量PSD和TIS参数,无需复杂光学标定或理想表面假设,工程实用性强。同时通过PSD参数化,可直接关联加工工艺(如抛光、镀膜)对散射的影响,为制造优化提供依据。

## 参考文献:

- [1] HE Y X, WANG Q, HAN X, *et al.*. Integrated solid-state lidar employing orthogonal polarizations and counter propagation [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(9): 090011.
- [2] YANG L, NIU H Q, WU SH X, *et al.*. Single-photon frequency-modulated continuous-wave Lidar based on quantum compressed sensing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(7): 072602.
- [3] 肖鹏益, 刘铭鑫, 闫磊, 等. 鬼像影响下的调制传递函数计算模型 [J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(5): 1183-1191.
- [4] XIAO P Y, LIU M X, YAN L, *et al.*. An MTF calculation model under the influence of ghost images [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1183-1191. (in Chinese).
- [5] 马博伦, 田爱玲, 王红军, 等. 卫星光通信系统中金属结构件的表面散射特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(1): 0106006.
- [6] MA B L, TIAN A L, WANG H J, *et al.*. Research of surface scattering characteristics of metal structures in satellite optical communication system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(1): 0106006. (in Chinese).
- [7] 冷荣宽, 王上, 王智, 等. 空间引力波探测前向杂散光测量和抑制 [J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(5): 1081-1088.
- [8] LENG R K, WANG SH, WANG ZH, *et al.*. Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1081-1088. (in Chinese).
- [9] 孙红胜, 梁新刚, 马维刚, 等. 空间探测用真空紫外光谱辐射计的校准 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(7): 765-772.

- SUN H SH, LIANG X G, MA W G, *et al.*. Calibration of VUV spectroradiometers for space exploration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(7): 765-772. (in Chinese).
- [7] 王虎, 陈钦芳, 马占鹏, 等. 杂散光抑制与评估技术发展及展望 (特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(7): 0751406.  
WANG H, CHEN Q F, MA ZH P, *et al.*. Development and prospect of stray light suppression and evaluation technology (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751406. (in Chinese).
- [8] MA ZH P, HANSEN P E, WANG H, *et al.*. Harvey-Shack theory for a converging-diverging Gaussian beam[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(5): 1162-1169.
- [9] 沈正祥, 余俊, 王晓强, 等. 面向激光探测的精密光机系统研制及应用[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(21): 2737-2751.  
SHEN ZH X, YU J, WANG X Q, *et al.*. Development and application of precision optical system for laser detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(21): 2737-2751. (in Chinese).
- [10] GÜNÖVEN M, NASSER H, ÜNAL M, *et al.*. Implementation of generalized Harvey-Shack theory in light scattering from rough surfaces[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(6): 063521.
- [11] 张丽芝, 陆秋萍, 段帆琳, 等. 长焦镜头光学系统设计及无热化研究[J]. *光学学报*, 2024, 44(8): 0822004.  
ZHANG L ZH, LU Q P, DUAN F L, *et al.*. Optical system design and athermalization of telephoto lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(8): 0822004. (in Chinese).
- [12] FEST E C. *Stray Light Analysis and Control*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2013.
- [13] ZENG CH L, XIA G Q, ZHONG X, *et al.*. Fast stray light performance evaluation based on BSDF and radiative transfer theory[J]. *Sensors*, 2023, 23(22): 9182.
- [14] DURY M R, THEOCHAROUS T, HARRISON N, *et al.*. Common black coatings-reflectance and ageing characteristics in the 0.32-14.3  $\mu\text{m}$  wavelength range[J]. *Optics Communications*, 2007, 270(2): 262-272.
- [15] 徐亮. 大口径光学系统杂散光测试关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019.  
XU L. *Research on key technologies of stray light measurement for large aperture optical system*[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese).
- [16] BUTLER S D, NAUYOKS S E, MARCINIAK M A. Comparison of microfacet BRDF model to modified Beckmann-Kirchhoff BRDF model for rough and smooth surfaces[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29100-29112.
- [17] 宋延松, 杨建峰, 李福, 等. 基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 194201.  
SONG Y S, YANG J F, LI F, *et al.*. Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 194201. (in Chinese).
- [18] 张运方, 朱飞虎, 郑岩, 等. 小行星地形探测激光雷达接收光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(4): 521-531.  
ZHANG Y F, ZHU F H, ZHENG Y, *et al.*. Design of receiving optical system for asteroid terrain detection LiDAR[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(4): 521-531. (in Chinese).
- [19] 周星宇, 孙亮, 潘俏, 等. 大相对孔径激光测距接收光学系统及杂散光抑制[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(5): 0528001.  
ZHOU X Y, SUN L, PAN Q, *et al.*. Large relative aperture receiving optical system and stray light suppression for laser ranging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(5): 0528001. (in Chinese).
- [20] 梅超. 大口径多光谱变焦光学系统杂散光分析与抑制技术研究[D]. 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2014.  
MEI CH. *The study of stray light analysis and suppressing technology in large pupil multi-spectral zoom optical system*[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2014. (in Chinese).

#### 作者简介:



张丽芝(1986—),女,山东淄博人,博士研究生,高级工程师,2012于浙江大学获得硕士学位,主要从事成像光学系统设计及开发方面的研究。E-mail: [zlj@yxopt.com](mailto:zlj@yxopt.com)



乔大勇(1977—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,2007年于西北工业大学获得博士学位,主要从事光学 MEMS 芯片及其应用、先进 MEMS 制造工艺等研究。E-mail: [dyqiao@nwpu.edu.cn](mailto:dyqiao@nwpu.edu.cn)