

单波长激光通信终端的隔离度

高伟饶 董科研 江伦

Isolation of single wavelength laser communication terminals

GAO Wei-rao, DONG Ke-yan, JIANG Lun

引用本文:

高伟饶, 董科研, 江伦. 单波长激光通信终端的隔离度[J]. *中国光学*, 2023, 16(5): 1137–1148. doi: 10.37188/CO.2022–0253

GAO Wei-rao, DONG Ke-yan, JIANG Lun. Isolation of single wavelength laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1137-1148. doi: 10.37188/CO.2022-0253

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0253>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星间激光通信终端光学天线的隔离度

Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 462 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0462>

X射线散射法测量Wolter-I型掠入射望远镜的表面粗糙度

Characterizing curved surface roughness of Wolter-I X-ray grazing incidence telescope

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 587 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0587>

星载激光通信技术研究进展

Progress of research on satellite-borne laser communication technology

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1260 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1260>

二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术

Coarse tracking technology of secondary imaging Coude-type laser communication terminal

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 644 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0644>

离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术

Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 486 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0486>

文章编号 2097-1842(2023)05-1137-12

单波长激光通信终端的隔离度

高伟饶^{1,2}, 董科研^{1,2*}, 江 伦^{1,2}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:单波长激光通信终端之间数据通信时, 信号传输与接收间良好的隔离性能是建立双工双向激光通信的关键。本文针对单个激光波长激光通信端机的传输与接收方案, 以及激光通信终端整体的通信性能, 分析了关键元器件的表面粗糙度和表面清洁度水平对激光通信终端隔离性能的影响。通过 Harvey 模型、ABg 模型推导模型参数。利用 TracePro 软件对所设计的方案进行分析。得出以下结论: 当信号传输通道中 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片和光学天线结构的表面粗糙度变好或者表面清洁度提升时, 元件带来的后向散射会降低信号传输通道内的隔离性能。同时, 激光通信终端隔离度的测量结果为 77.86 dB, 与软件仿真结果 78.35 dB 基本一致, 这一结果可以应用于激光通信系统。

关键词:激光通信; 杂散光分析; 隔离度; 表面粗糙度; 表面清洁度

中图分类号: TN929.13 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0253

Isolation of single wavelength laser communication terminals

GAO Wei-rao^{1,2}, DONG Ke-yan^{1,2*}, JIANG Lun^{1,2}

(1. School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China;

2. Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and
Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: dongkeyan@163.com

Abstract: For data communication between single wavelength laser communication terminals, good isolation between signal transmission and reception is the key to establishing duplex bidirectional laser communication. In this paper, with respect to the transmission and reception scheme of a single laser wavelength laser communication terminal and its overall communication performance, the influence of the surface roughness and contamination level of key components on the isolation performance of the laser communication terminal is analyzed. The model parameters are derived from Harvey model and ABg model, and the designed scheme is analyzed using TracePro software. When the surface roughness or contamination level of $\lambda/2$ wave plate, $\lambda/4$ wave plate and optical antenna structure in the signal transmission channel is improved, the backscattering caused by these elements will reduce the isolation performance in the signal transmission channel.

收稿日期: 2022-12-12; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U2141231, No. 91838301)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2141231, No. 91838301)

At the same time, the measurement result of laser communication terminal isolation is 77.86 dB, which is basically consistent with the software simulation result of 78.35 dB. This can be applied in laser communication system.

Key words: laser communication; stray light analysis; isolation; roughness; contamination level

1 引言

空间激光通信具有通信频带宽、数据传输速度快、良好的性价比、易于部署和通信安全等优点,系统整体体积小、重量轻、功耗低,在很多领域均有需求^[1-3]。因此,一对一、一对多的空间激光通信得到了高速发展^[4-6]。目前,空间激光通信多采用收发一体式的双工通信,即信号的接收和发射使用共同的光学天线。这种方法既节省了空间又提高了通信效率^[7]。但在通信发射阶段整体光学系统内的光机等器件会产生后向散射光,杂散光会通过光路返回并进入探测器,从而造成信噪比降低,甚至直接吞灭接收到的信号,严重影响通信质量。

吕博^[8]等人针对同轴两反射镜在未使用主镜筒外遮光罩的前提下,对次镜遮光罩进行优化设计以实现杂散光抑制。验证了紧凑型大视场折反射光学杂散光抑制结构的可行性。夏方圆^[9]等人通过对卡塞格伦光学天线的次镜打孔和在光路中增加光陷阱的方式抑制后向散射,提高系统隔离度。曲杨^[10]等人在 3D 激光视觉系统中,利用偏振分光隔离的方法,以及通过旋转一定角度来降低 $\lambda/4$ 波片表面反射杂散光,上述方法均达到了较好的隔离效果。然而,目前针对激光通信系统中光学单元的加工工艺与光学设计结构相结合的研究相对较少,因此有必要通过激光通信系统中光学单元的加工工艺要求与光学设计结构对共口径通信结构的隔离效果进行详细分析。

本文设计了一个由抛物面反射镜和透镜组成的离轴抛物面反射式光学结构,对结构中透镜元件的表面粗糙度和透镜元件表面清洁度两方面展开研究,并对激光通信终端进行仿真分析。最后得出以下结论:终端内关键元件表面粗糙度会影响隔离性能,隔离度随粗糙度的增大逐渐变小。同时,在同等条件下,随着各个元件表面清洁度水平的提高,激光通信终端内隔离性能也会逐渐降低。

2 整体结构设计

为满足激光通信系统的设备要求,本文设计了一种收发一体的双工通信模式,如图 1 所示。本方案中使用 56° 偏振分光棱镜进行偏振分光。常用的 45° 偏振分光棱镜以 45° 角入射,反射光与入射光成 90° 角,本方案与其不同。本方案中,光束以布儒斯特角入射,反射光与折射光互相垂直。这样可以相对减少由棱镜透射的部分偏振光在通道壁反射后的回光对信号接收端的影响。

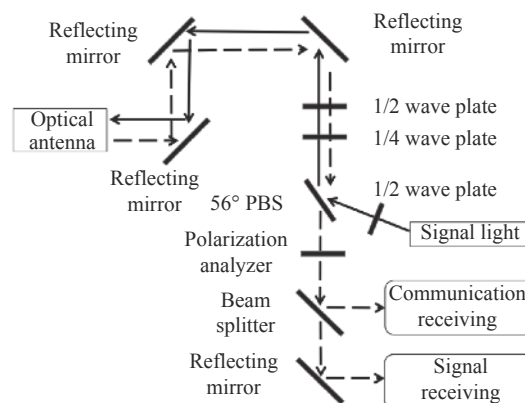


图 1 激光通信整体结构

Fig. 1 Structure of the laser communication system

同时,由图 1 可以看出整体的工作情况如下:信号光通过 $\lambda/2$ 波片调整偏振方向, S 线偏振光经 56° 偏振分光棱镜反射到 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片,偏振态转换为圆偏振光,由光学天线发射信号。信号接收时,光学天线接收到圆偏振光后,经过 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片转换为 P 线偏振光,最后由 56° 偏振分光棱镜和检偏器同时对 P 线偏振光以外的杂散光进行隔离,并由信号接收机对信号进行接收分析。但在信号传输过程中,其他光学元件和天线结构所产生的表面散射仍然会以杂散光的形式到达信号接收端,导致信噪比下降。所以需要分析光学天线和整体结构中的影响因素,提高系统通道内的隔离度。

3 杂散光分析理论基础

3.1 隔离度模型定义

本文主要研究信号光在传输过程中对信号接收端的影响。根据信号光收发通道隔离的定义, 隔离度可以写为^[11]:

$$IS = -10 \log \left(\frac{E_r}{E_i} \right), \quad (1)$$

其中: E_i 表示信号光的发射功率, E_r 表示信号接收端的杂散光功率。

设发射信号光 S 线偏振光琼斯矢量为:

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

信号光在系统中传输的过程中, 信号接收端接收到的光学系统中的后向辐射杂散光功率可表述为^[11]:

$$P_r = I_r \cdot \Omega \cdot F_{\text{BRDF}}, \quad (3)$$

式中: I_r 表示信号接收端接收到的杂光光强, Ω 表示信号接收的立体角, F_{BRDF} 表示光学系统中光学元件表面的双向反射函数。

使用 Kirchhof 理论对双向反射分布函数 (Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF) 建模, 表示元件表面反射及散射情况^[12]。则粗糙元件表面反射光可以表示为:

$$F_{\text{BRDF}} = F_{\text{sp}} + F_{\text{dd}} + F_{\text{ud}}, \quad (4)$$

F_{sp} 一般包括镜面反射, F_{dd} 表示漫反射或者说是镜面反射和漫反射之间的反射, F_{ud} 表示均匀漫反射。通常, 镜面反射是部分偏振的, 并且相对于照明区域的局部表面法线指向镜面方向。但是当镜面反射的一部分光入射到材料表面的另一部分上时, 则会产生镜面反射偏振的部分偏振, 并且再次指向相对于该照明区域的局部表面法线的镜面方向。重复多次会导致散射, 该散射是非偏振的。所以本文只考虑 F_{ud} 均匀漫反射产生的偏振相关杂光对信号接收端的影响。公式 (4) 可写为:

$$F_{\text{BRDF}} = F_{\text{ud}}. \quad (5)$$

总积分反射 (Total Integrated Scatter, TIS)^[13] 作为元件材料表面的一个重要光学特性, 可以表

达元件表面的均方粗糙度。其与粗糙度之间的关系可表示为:

$$TIS = \left[\frac{2\pi\Delta n\sigma \cos\theta_i}{\lambda} \right]^2, \quad (6)$$

其中: σ 为镜面均方粗糙度; λ 表示波长; θ_i 为反射角; Δn 为元件界面折射率差 ($\Delta n=2$ 为反射镜面)。基于 Lambert 散射模型的定义, 光学系统中各元件表面上的双向反射率分布函数 (F_{BRDF}) 与 TIS 之间的关系可以写成:

$$F_{\text{BRDF}} = \frac{TIS}{\pi}. \quad (7)$$

波信号接收立体角 Ω 可以通过接收端光学孔径 D 和光学子系统后截距 L_1 表述:

$$\Omega = \frac{\pi D^2}{16L_1^2}. \quad (8)$$

根据图 1 所示路径可知, 信号光到达光学天线抛物面的光强可以表示为:

$$E_2 = J_3 \cdot J_2 \cdot J_1 \cdot J_{\text{hwp}} \cdot J_{\text{qwp}} \cdot J_{\text{pbs}} \cdot E_1 = r_1 r_2 r_3 r_4 \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: J_3 、 J_2 、 J_1 表示反射镜琼斯矩阵; J_{hwp} 、 J_{qwp} 、 J_{pbs} 分别表示二分之一波片、四分之一波片、偏振分光棱镜的琼斯矩阵; r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 表示反射系数。

通过穆勒矩阵对后向反射光推导到达探测器的光强, 则经归一化的自然光斯托克斯矢量为:

$$E_R = r_b \cdot M_p \cdot M_{\text{pbs}} \cdot M_{\text{qwp}} \cdot M_{\text{hwp}} \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot E_s, \quad (10)$$

$$E_R = 2 \cdot r_b \cdot r_4 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 + \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2 & 1 - \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T, \quad (11)$$

其中: r_b 表示能量分光镜的反射系数; 检偏器、偏振分光棱镜、四分之一波片、二分之一波片的穆勒矩阵分别为 M_p 、 M_{pbs} 、 M_{qwp} 、 M_{hwp} ; 反射镜的反射系数分别 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 。所以后向反射杂光到达信号接收端的杂光光强为:

$$I_r = 2 \cdot r_b \cdot r_4 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3^2 \cdot (1 + \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2). \quad (12)$$

将公式 (12) 代入公式 (3) 后与公式 (1) 联立得到激光通信终端信号收发隔离度公式为:

$$IS = -10 \lg 2 \cdot r_b \cdot r_4 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_3^2 \cdot (1 + \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^2) \cdot \frac{\pi D^2}{16 L_1^2} \cdot \left(\frac{2 \Delta n \sigma \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \cdot \pi \quad (13)$$

鉴于各个光学元件的反射系数、消光比以及接收立体角均为已知的固定数值,并且波片的旋转角度对隔离度影响较小,所以本文使用 TracePro 软件对光路中的光学元件表面粗糙度进行隔离度仿真分析。同时,通过光学元件的表面清洁度对隔离度的大小进行仿真分析。

3.2 基础理论模型

本文针对光学望远单元中离轴抛物面、离轴反射镜、准直透镜组和系统中 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片的表面粗糙度和表面清洁度进行仿真分析。通过 Harvey 模型与 ABg 模型对望远单元和通信支路中的各个元件进行 BRDF 建模,并通过 TracePro 软件模拟隔离度的变化。

3.2.1 表面粗糙度模型

双向散射分布函数 (Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF) 表示结构中各个单元的散射特性^[14-15]。本文在杂散光分析中主要考虑光学单元的反射特性,所以使用 BRDF 代替 BSDF。杂散光的强弱与 BRDF 有直接关系。降低 BRDF,可以降低信号通道内的杂光传输。所以本文主要建立 BRDF 模型。

Harvey 模型是对光学表面 BRDF 进行建模的常见方法,并得到了大多数杂散光软件的支持。ABg 模型与 Harvey 模型非常相似,可以利用 Harvey 模型对 ABg 模型参数进行计算仿真。ABg 模型是直接应用 TracePro 软件的一种模型计算方式,其函数形式为:

$$BRDF = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g} \quad (14)$$

其中: A 、 B 、 g 为待定参数, β 、 β_0 为反射方向和入射方向的方向余弦。

Harvey 模型对于镜面的散射表达式为:

$$BRDF(|\sin \theta_s - \sin \theta_i|) = b_0 \left[1 + \left(\frac{|\sin \theta_s - \sin \theta_i|}{L_2} \right)^2 \right]^{s/2} \quad (15)$$

其中: θ_s 、 θ_i 分别为散射角和镜面反射角,是常数, L_2 的翻转角,通常在 0.001 量级或者更小量级, s 表示 Harvey 模型取值大于 L_2 时的斜率因子,用

于表示镜面散射分布程度。获得数据拟合时, Harvey 模型中的常数可以通过 TIS 计算得到^[16]:

$$TIS \cong 2\pi b \frac{100^s}{s+2} \quad (16)$$

当取得典型值,波长为测试波长 (632.8 nm) 时, Harvey 模型与 ABg 模型可以通过相应的公式得出与其对应的 ABg 模型参数,如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。公式如下^[17]:

$$A = b_0 B \quad (17)$$

$$B = L_2^{-s} \quad (18)$$

$$g = -s \quad (19)$$

本文中,系统工作波段为 1550 nm,对于系统光路中 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片及准直透镜组,选取表面粗糙度分别为 3、6、9、12、15 nm,分析隔离度的变化。

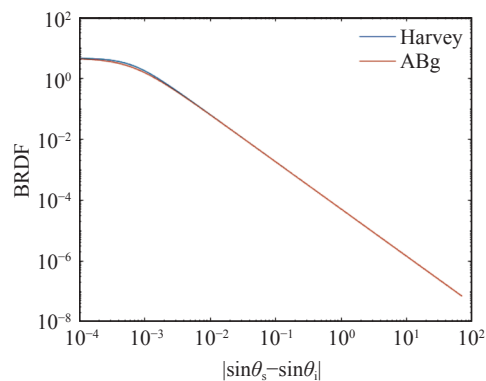


图 2 Harvey 模型与 ABg 模型

Fig. 2 Harvey and ABg models

不同均方粗糙度下的 ABg 散射模型参数见表 1。

表 1 不同表面粗糙度 ABg 模型参数

Tab. 1 ABg model parameters for different surface roughnesses

表面粗糙度 (nm)	A	B	g
3	4.2365×10^{-5}	4.4415×10^{-5}	1.55
6	1.6940×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
9	3.8130×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
12	6.7787×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
15	1.0580×10^{-3}	4.4415×10^{-5}	1.55

已知光轴的入射角,通过公式 (6) 计算得到光学天线中离轴抛物面与离轴反射镜的表面粗糙

度分别为 3、6、9、12、15 nm 时的 TIS 数值。根据 Harvey 模型计算不同均方粗糙度相对应的 ABg 模型参数, 如表 2 所示。

表 2 不同表面粗糙度光学天线 ABg 模型参数

Tab. 2 ABg model parameters of the optical antenna with different surface roughnesses

表面粗糙度(nm)	A	B	g	
主镜	3	3.0643×10^{-5}	4.4415×10^{-5}	1.55
	6	1.2257×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
	9	2.7579×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
	12	4.8737×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
	15	7.6152×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
次镜	3	4.0426×10^{-5}	4.4415×10^{-5}	1.55
	6	1.6171×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
	9	3.6384×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
	12	6.4682×10^{-4}	4.4415×10^{-5}	1.55
	15	1.0106×10^{-3}	4.4415×10^{-5}	1.55

3.2.2 表面污染模型

洁净元件表面的颗粒污染水平通常通过表面清洁度 (Contamination Level, CL)^[18] 描述, 通常使用针对洁净室规范导出的 (IEST)CC1246D 标准定义分布。给出了清洁度或“污染水平”的函数:

$$N = 10^{|\alpha|[\log_{10}^2(CL) - \log_{10}^2(\beta_1)]} \quad (20)$$

其中: CL 表示表面的清洁度水平; N 表示直径大于或等于微米的每平方英尺的颗粒数量。斜率常数在文中取 0.926, 表示在洁净元件表面进行颗粒污染分析。图 3(彩图见期刊电子版)给出了不同 CL 下, N 与 β_1 之间的关系。

对颗粒分布进行分析, 将所有不同大小的污染颗粒的污染颗粒密度之和定义为污染颗粒覆盖率 (Percent Area Covered, PAC)^[16]。颗粒覆盖面积百分比 PAC 计算如下:

$$PAC = 10^{M + |\alpha| \log_{10}^2(CL)} \quad (21)$$

式中 M 为常数, 当 $\alpha = 0.926$, $M = -7.245$ 时, 表面污染散射引起的表面总积分散射 (TIS) 可通过污染颗粒覆盖率 (PAC) 得到:

$$TIS \cong PAC/100 \quad (22)$$

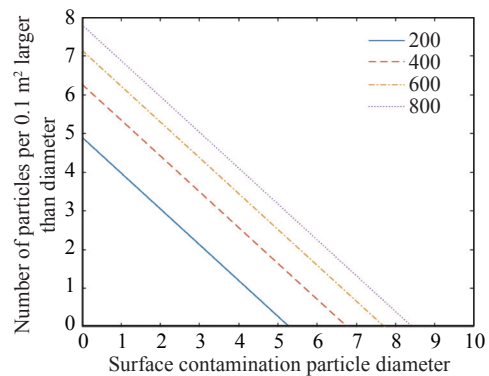


图 3 CL 分别为 200、400、600、800 时对应的 N 与 β_1 之间关系

Fig. 3 The relationship between N and β_1 when CL are 200, 400, 600 and 800, respectively

依据颗粒覆盖率和表面清洁度的关系, 以及颗粒覆盖率和 BRDF 的比例关系, 在 1550 nm 工作波长表面清洁度分别为 200、400、600、800 时对应的污染颗粒覆盖率分别为 4.55×10^{-3} 、0.106、0.798、3.63。通过公式 (22) 可得到不同清洁度 (CL) 水平下的颗粒污染 BRDF 数据, 并将其数值用 ABg 模型进行拟合, 如表 3 所示。

表 3 不同清洁度 (CL)ABg 模型参数

Tab. 3 ABg model parameters for different contamination levels

表面清洁度CL	A	B	g
200	7.237×10^{-6}	6.102×10^{-5}	1.5
400	1.685×10^{-4}	6.102×10^{-5}	1.5
600	1.271×10^{-3}	6.102×10^{-5}	1.5
800	5.769×10^{-3}	6.102×10^{-5}	1.5

4 测量实验与结果

4.1 整体光学设计

光学天线采用离轴抛物面式设计, 以提高通信收发及探测视场, 而无中心遮拦的设计则降低了系统能量损耗。如表 4 所示: 表中的指标参数为设计要求, 中心波长采用 1550 nm; 系统的缩束倍率为 10 倍; 出射口径为 $\Phi 75$ mm; 系统的最后接收视场按照信标探测的视场进行设计; 设计视场为 5 mrad。

根据表 4 中的指标利用 Zemax 软件完成了

表 4 光学设计指标
Tab. 4 Optical design indexes

指标	参数
倍率	10×
入瞳直径/mm	75
设计波长/nm	1550
最大接收视场/mrad	5
激光发射功率/dBm	33
接收器灵敏度	-45 dBm@10 Gbps

如图 4 所示的光学设计。

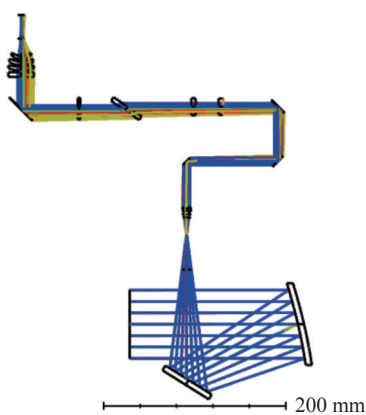


图 4 光学设计整体布局图

Fig. 4 Overall layout diagram of optical design

光学系统的 MTF 曲线如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。由图 5 可知, 调制传递函数曲线在

0°视场时接近衍射极限。该光学设计中, 主镜为离轴抛物面, 其他的转折镜均为平面反射镜, 这样可以最大限度地节省空间, 实现设备的小型化。

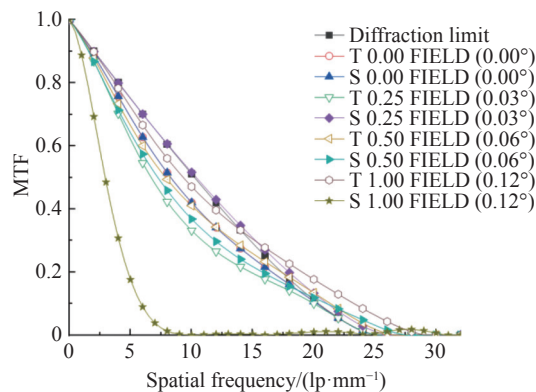
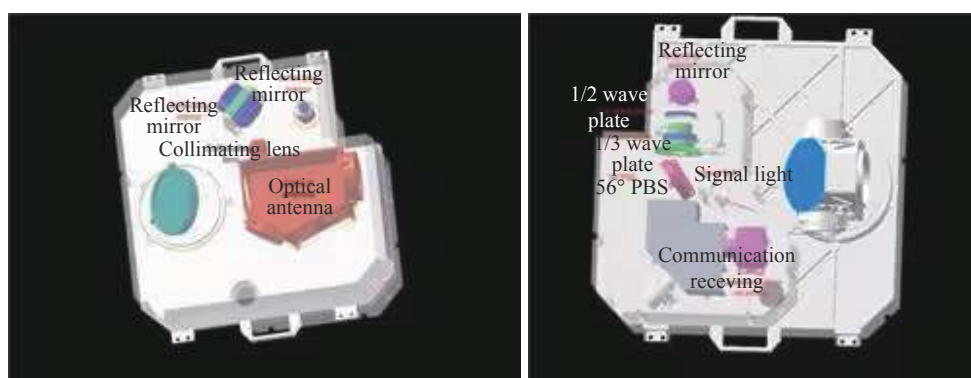


图 5 光学系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF of the designed optical system

对所设计光路建立整体的光机结构, 如图 6 所示。通过平面反射镜转折光路将整个系统放置在一个平板的左右两侧, 充分利用了整体空间。图 6(a) 为光学天线的缩束系统, 图 6(b) 为光学系统的子光路, 信号的发射端、接收端、56°偏振分光棱镜、 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片等元件。且在使用 TracePro 软件进行分析时, 端机的材料设置为铝材料, 并进行涂黑漆处理, 透镜元件按照设计提供的材料和计算出的模型参数进行设置。



(a) 光学天线
(a) Optical antenna

(b) 光学系统的子光路
(b) Sub-optical path of optical system

图 6 光学机械结构

Fig. 6 Optical-mechanical structures

4.2 系统中镜面粗糙度对端机隔离度的影响

在 TracePro 中设置表 1, 表 2 中换算得到的 ABg 模型参数, 改变 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片及光学天

线表面的 ABg 模型参数, 分析不同粗糙度对隔离度的影响, 同时, 确定表面清洁度水平为 $CL=400$, 本文设置为洁净元件表面进行颗粒污染分析, 且

CL=500 以下的颗粒污染的 BRDF 要远小于洁净镜面的 BRDF, 其对颗粒污染镜面 BRDF 的贡献相对减少^[15]。在 1550 nm 工作波长下, 表面清洁度在 400 时对应的污染颗粒覆盖率为 0.106, 相

应参数如表 3 所示。探测器接收端接收的回光仿真结果如图 7 所示。TracePro 中设置发射总光线数为 70 万, 总光通量为 1 W, 光线追迹阈值为 1×10^{-7} 。

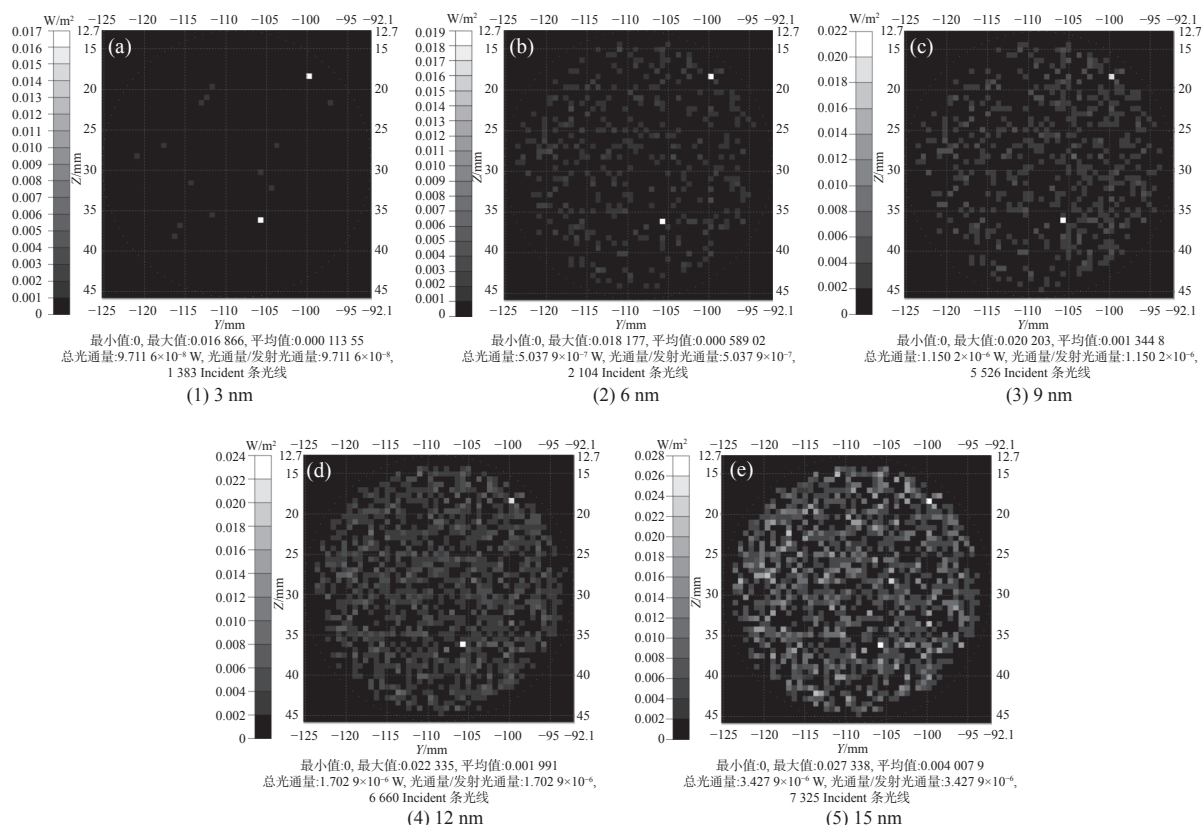


图 7 不同表面粗糙度下的端机接收面光通量。(a)3 nm; (b)6 nm; (c)9 nm; (d)12 nm; (e)15 nm

Fig. 7 The luminous flux of the receiving surfaces under different surface roughnesses. (a) 3 nm; (b) 6 nm; (c) 9 nm; (d) 12 nm; (e) 15 nm

通过图中光通量可计算出在不同粗糙度情况下激光通信终端内部的隔离度, 如折线图 8 所示。由图 8 可知, 在各个元件参数相同的情况下, 改变 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片及光学天线镜面粗糙度参数, 相比于 3 nm 镜面粗糙度, 当镜面表面粗糙度为 15 nm 时, 隔离度降低了 13.28 dB。同时, 使用 Matlab 软件绘制公式 (13) 隔离度曲线图。式中反射系数设置为 0.99, 偏振分光棱镜的消光比设置为 0.001, θ_i 设置为 0.02 rad, 最终与表面粗糙度相关的隔离度曲线如图 9 所示。通过对比两折线图可以发现表面粗糙度在 3 nm 至 15 nm 区间变化时其隔离度的降低趋势基本一致。两种计算方式中, Matlab 软件是利用文中公式 (13) 模型进行的隔离度计算, 公式中的反射系数、琼斯矩阵等模型考虑了根据 Zemax 设计计算光学元件带

来的影响, 所以其计算过程不考虑激光通信终端内其他机械器件散射情况, 结果更趋近于理想情况。Tracepro 软件是依据设计的整体激光通信终

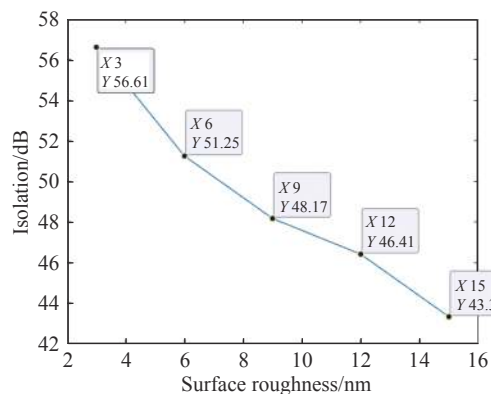


图 8 不同表面粗糙度下的端机隔离度曲线

Fig. 8 Isolation curve under different surface roughnesses

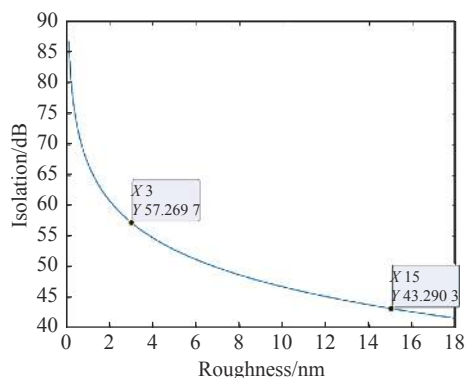


图 9 不同表面粗糙度端机隔离度 Matlab 曲线

Fig. 9 Matlab curve of end machine's isolation with surface roughness

端模型进行仿真, 仿真中对于机械结构组件会设置材料属性, 光线追迹时会模拟设置阈值、随机光线数、随机乱数种子, 所以在 Tracepro 软件计

算过程中, 机械结构组件的散射情况也会添加到隔离效果的计算中, 导致两种方法存在一定差别。

4.3 系统中镜面污染对端机隔离度的影响

对镜面污染仿真首先假定镜面的污染分布均匀, 且颗粒之间的间隔远大于颗粒半径。在 TracePro 中设置如表 3 所示的元件表面 ABg 模型, 改变清洁度水平, 以分析不同污染程度对端机内隔离度的影响。在进行分析时各表面粗糙度均设置为 5 nm。由公式 (6) 可计算出表面粗糙度为 5 nm 对应的 TIS 数值为 1.61×10^{-3} , ABg 模型参数 $A=1.152 \times 10^{-4}$ 。图 10 为清洁度分别为 200、400、600、800 时 TracePro 仿真得到光通量图。TracePro 中同样设置发射总光线数 70 万, 总光通量为 1 W, 光线追迹阈值为 1×10^{-7} 。

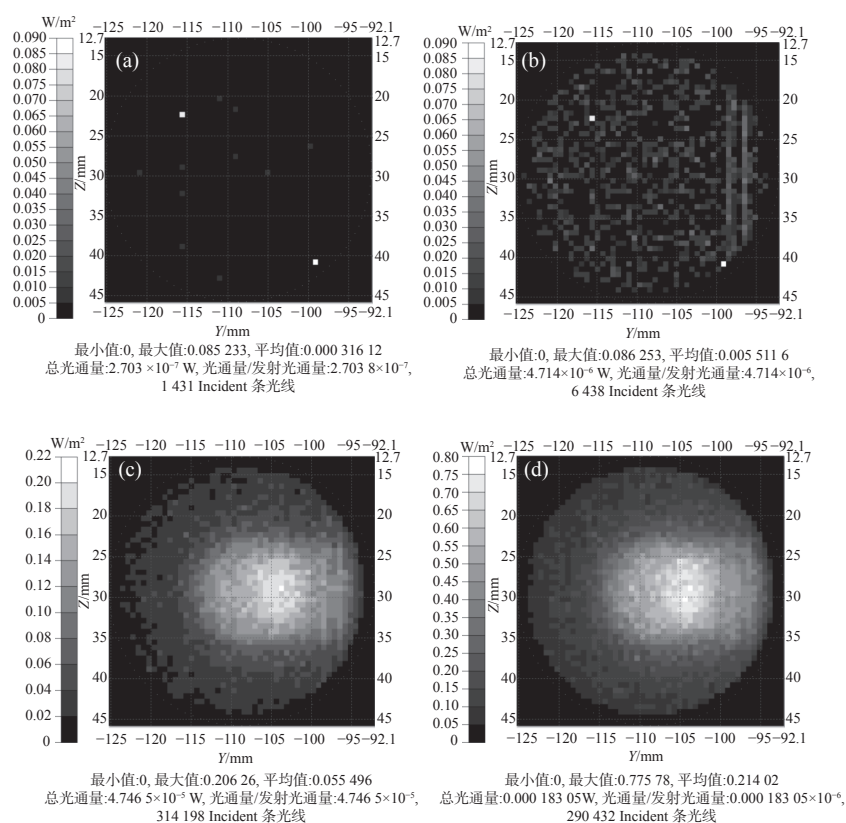


图 10 不同的清洁度水平端机接收面光通量。(a)CL=200; (b)CL=400; (c)CL=600; (d)CL=800

Fig. 10 The luminous flux of the receiving surface with different contamination levels. (a) CL=200; (b) CL=400; (c) CL=600; (d) CL=800

通过图 10 光通量可计算出在不同清洁度水平下激光通信终端内部的隔离度, 如折线图 11 所示。由图 11 可知, 在各个元件参数相同的情况下, $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片及光学天线的表面清洁度

水平不断下降, 导致激光通信终端内的隔离度不断下降, CL=800 时低至 37.37 dB。图 12 为 Matlab 软件根据式 (13)、式 (21) 绘制的不同清洁度水平下的隔离效果变化曲线。通过两种模

型的对比可以看出表面清洁水平在 $CL=200$ 至 $CL=800$ 之间激光通信终端的隔离效果变化趋势基本一致。两种方式的仿真结果同样存在一定偏差。这是由于 Matlab 软件是根据公式中的变量进行绘图的, 不考虑终端中其他机械结构对隔离效果的影响, 对 Tracepro 软件进行仿真绘图时整体端机模型均进行仿真计算, 散射、反射因素会影响系统的隔离效果。

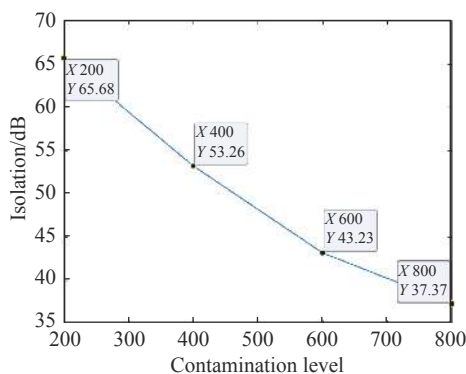


图 11 不同清洁度水平的隔离度曲线

Fig. 11 Isolation curve of different contamination level

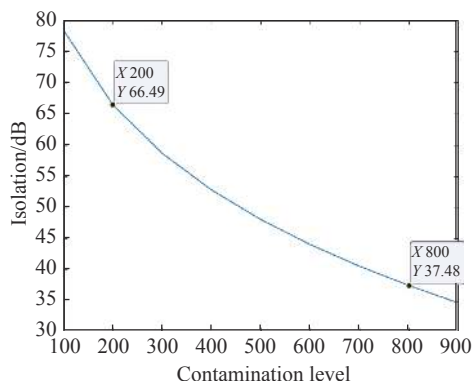


图 12 不同清洁度水平的隔离度 Matlab 曲线

Fig. 12 Matlab curve of isolation with different contamination levels

4.4 激光通信终端隔离效果双因素分析

在光学系统的实际工作中, 表面粗糙度与表面污染程度变量会相互作用, 这应该加以考虑。因此, 本文深入探讨了表面粗糙度与表面污染程度对激光通信终端通道隔离的影响。

激光通信终端通道系统中的反射系数设置为 0.99, 偏振分光棱镜的消光比设置为 0.001, θ_i 设置为 0.02 rad, 考虑到非理想情况下表面清洁度水平设置为 $CL=200$ 至 $CL=800$, 表面粗糙度设置为 0.5 nm 至 15 nm 之间的值。通过在上

述范围内改变这两个影响因素, 分析了隔离对其变化的敏感性, 并绘制了在实际工程中可实现的隔离效果变化曲面图, 如图 13 所示。x 轴表示不同的表面粗糙度、y 轴表示不同表面清洁度水平、z 轴表示隔离度。两个变量 (即表面粗糙度 σ 和表面污染程度) 对隔离的交叉影响相同, 但隔离范围不同。具体来说, 使用 1550 nm 的工作波长, 激光通信终端通道隔离范围为 27.93~86.49 dB。

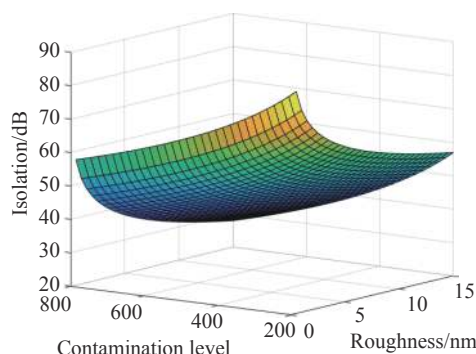


图 13 激光通信终端隔离度双变量分析图

Fig. 13 Two-variable analysis diagram of laser communication terminal isolation

本节分析的实际意义在于, 在单波长的激光通信终端设计中, 根据获得的隔离特征曲面图, 优化终端隔离效果, 可在表面粗糙度和表面污染程度之间权衡, 取得最佳值。

4.5 优化参数提升隔离度

本激光通信终端发射功率为 33 dBm, 通信接收机灵敏度为 -45 dBm@10 Gbps, 根据 4.4 节双变量分析结果, 对仿真模型进行优化。如图 14 (彩图见期刊电子版) 所示。表面粗糙度为固定值时。由于表面清洁度水平 $CL=300$ 至 $CL=400$ 间

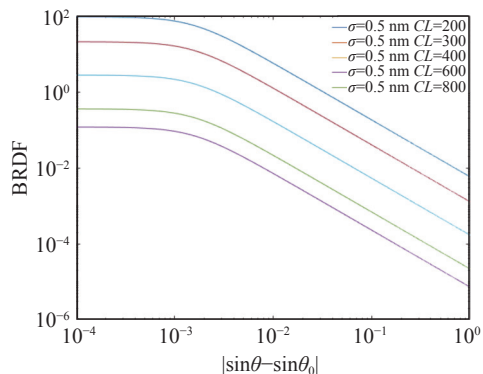


图 14 不同表面清洁度 BRDF 曲线

Fig. 14 BRDF curves of different contamination levels

的跳跃幅度较大,而本文中激光通信终端的光学元件应使其清洁度水平低于 300。

表面粗糙度为 0.5 nm 时, ABg 模型中 B 、 g 参数仍分别为 4.4415×10^{-5} 、1.55, 确定 A 值为 1.1837×10^{-6} , 光学天线的主次镜对应的 ABg 模型中参数 A 分别为 8.5121×10^{-7} 、 1.1230×10^{-6} 。对此参数进行仿真分析, 结果如图 15 所示, 此时的隔离度为 78.35 dB。达到了基本的指标要求。

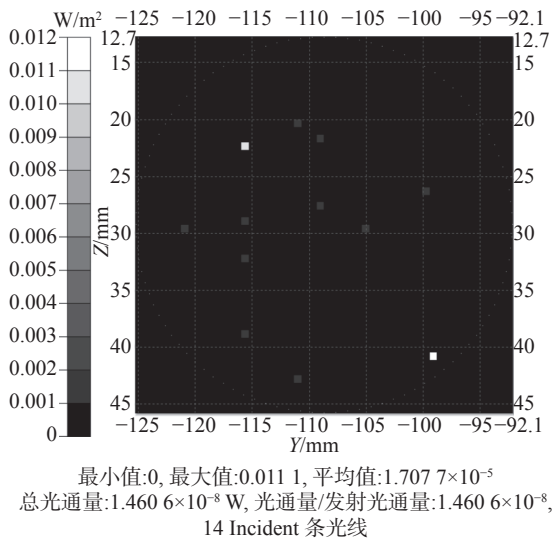


图 15 粗糙度为 0.5 nm 端机接收面光通量

Fig. 15 Terminal's receiving surface light flux with surface roughness of 0.5 nm

5 实验验证与测量

本节根据图 6 软件模型结构设计了通信终端模型, 将根据设计的通信终端模型来验证 4.5 小节仿真计算得到的收发隔离度。整体测试环境如图 16 所示。

在测试中镜片表面粗糙度小于 1 nm, 偏振器件的消光比为 1000:1。在测试过程中, 激光放大器输出不同功率的激光束, 测量探测器接收的光束功率, 如表 5 所示。当输出功率不同时, 测量探测器接收到的杂散光功率, 并计算通信终端的隔离度。通过测量, 其平均隔离度为 77.86 dB。使用所建立的模型仿真的隔离度为 78.35 dB。测量值与计算结果的差值为 0.49 dB。通过详细分析端机和测量过程, 通信接收机的灵敏度为 -42 dBm, 存在误差。因此, 可以判断测量结果与仿真结果基本一致。

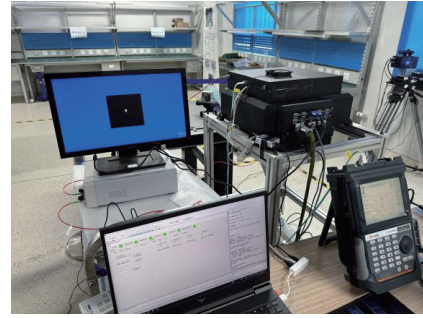


图 16 隔离度测试端机

Fig. 16 Isolation test setup

表 5 隔离度测试结果

Tab. 5 Test results of isolation

	1	2	3	平均值
发射功率/dBm	28	29	30	
通信接收功率/dBm	-49.8	-49.0	-47.8	
隔离度/dB	77.8	78.0	77.8	77.86

6 结论

本文设计了一种单波长的激光通信终端信道, 分光结构选用 56° 偏振分光棱镜代替常用 45° 偏振分光棱镜, 减少部分杂光信号对探测器的影响。并通过设置不同的 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片、光学望远单元中离轴抛物面、离轴反射镜、准直透镜组的表面粗糙度和元件清洁度水平模型数据来优化光学系统。利用 TracePro 平台对激光通信终端模型进行相关仿真。根据模拟结果可知: $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片、光学望远单元中的离轴抛物面、离轴反射镜、准直透镜组的表面粗糙度影响着隔离度水平。随着粗糙度增大, 隔离度逐渐变小。同时, 在同等条件下的模拟结果显示, 随着各个镜片的表面清洁度水平的增大, 激光通信终端内隔离度也会逐渐降低。因此, 为了保持激光通信终端内的隔离度, 应严格控制表面粗糙度, 并且在进行系统安装时应保证各元件表面清洁度水平。最后, 根据各个元件镜片表面粗糙度为 0.5 nm 时, 激光通信终端内部探测器隔离度为 78.35 dB 的仿真结果建立了通信终端实体模型。测量的隔离度实际平均值为 77.86 dB, 与模型仿真结果基本一致。上述结果验证了模型仿真准确性。

参考文献:

- [1] 姜会林,付强,赵义武,等.空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J].物联网学报,2019,3(2):1-8.
JIANG H L, FU Q, ZHAO Y W, *et al.*. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(2): 1-8. (in Chinese)
- [2] 高世杰,吴佳彬,刘永凯,等.微小卫星激光通信系统发展现状及趋势[J].中国光学,2020,13(6):1171-1181.
GAO SH J, WU J B, LIU Y K, *et al.*. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1171-1181. (in Chinese)
- [3] 田思聪,佟存柱,王立军,等.长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展[J].中国光学(中英文),2022,15(5):946-953.
TIAN S C, TONG C ZH, WANG L J, *et al.*. Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 946-953. (in Chinese)
- [4] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 57-96.
- [5] 李禹希,张刘,陈思桐,等.基于自抗扰算法的光电跟踪伺服控制方法研究[J].中国光学,2022,15(3):562-567.
LI Y X, ZHANG L, CHEN S T, *et al.*. Photoelectric tracking servo control method based on active disturbance rejection algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 562-567. (in Chinese)
- [6] 高铎瑞,李天伦,孙悦,等.空间激光通信最新进展与发展趋势[J].中国光学,2018,11(6):901-913.
GAO D R, LI T L, SUN Y, *et al.*. Latest developments and trends of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [7] 吴从均,颜昌翔,高志良.空间激光通信发展概述[J].中国光学,2013,6(5):670-680.
WU C J, YAN CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communications[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)
- [8] 吕博,冯睿,寇伟,等.折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J].中国光学,2020,13(4):822-831.
LÜ B, FENG R, KOU W, *et al.*. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831. (in Chinese)
- [9] 夏方园,杨建峰,么周石,等.卡塞格伦光学天线收发隔离度分析与测试[J].光子学报,2017,46(10):1023001.
XIA F Y, YANG J F, YAO ZH SH, *et al.*. Transmit-receive isolation analysis and test of cassegrain optical antenna[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1023001. (in Chinese)
- [10] 曲杨.高精度低成本激光振镜扫描3D视觉系统关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
QU Y. Key technologies of high precision and low cost galvanometer scanning laser 3D vision system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] XIA F Y, YANG J F, YAO Z S, *et al.*. Investigation of isolation for free space laser communication in the mono-wavelength optical T/R channels[J]. *Optik*, 2019, 181: 738-747.
- [12] 凌晋江,李钢,张仁斌,等.偏振光谱BRDF建模与仿真[J].光谱学与光谱分析,2016,36(1):42-46.
LING J J, LI G, ZHANG R B, *et al.*. Modeling and simulation of spectral polarimetric BRDF[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 42-46. (in Chinese)
- [13] BENNETT H E. Scattering characteristics of optical materials[J]. *Optical Engineering*, 1978, 17(5): 175480.
- [14] 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)
- [15] 李茂月,刘泽隆,赵伟翔,等.面结构光在机检测的叶片反光抑制技术[J].中国光学,2022,15(3):464-475.
LI M Y, LIU Z L, ZHAO W X, *et al.*. Blade reflection suppression technology based on surface structured light on-machine detection[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 464-475. (in Chinese)
- [16] 石栋梁.基于BRDF的光机系统杂散辐射研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
SHI D L. Research on stray light of optical and mechanical system based on BRDF[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

- [17] 李朝辉, 赵建科, 徐亮, 等. 点源透过率测试系统精度标定与分析[J]. *物理学报*, 2016, 65(11): 114206.
LI ZH H, ZHAO J K, XU L, *et al.*. Analysis and calibration of precision for point source transmittance system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 114206. (in Chinese)
- [18] HUBBARD R. M1 microroughness and dust contamination[EB/OL]. (2013-11). <https://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/docs/TN-0013-D.pdf>.

作者简介:



高伟饶(1993—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 2023 年于长春理工大学光电工程学院获得硕士学位, 主要研究方向为空间激光通信。E-mail: 1195671019@qq.com



董科研(1980—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学系统设计、激光通信和光谱仪器设计等方面的研究。E-mail: dongkeyan@163.com



江 伦(1984—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 2012 于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光学系统设计、空间光学与空间光通信技术的研究。E-mail: jlciomp@163.com