

文章编号 1004-924X(2026)17-2633-09

空间目标激光测距光学系统设计

姜晰文*, 赵勇志, 吕天宇, 陈宝刚, 周 超

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 吉林省智能波前传感与控制重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要:为提高空间目标轨道测定精度和航天器机动规避能力,提出一种空间目标激光测距光学系统的设计方法。所设计的非共轴收发激光测距光学系统由主光学系统和激光发射系统组成。主光学系统采用 700 mm 口径卡塞格林结构,经一次成像后再次准直、分光,分别实现目标监视成像与回波信号接收功能。其中,目标监视成像系统波长为 1 100~1 700 nm,焦距为 4 200 mm,视场为 0.168°,全视场奈奎斯特频率 33.3 lp/mm 处 MTF 大于 0.5;回波信号接收系统将主口径接收到的 1 064 nm 光准直缩束为 12 mm 口径平行光,经透镜组汇聚到单光子探测器 80 μ m 的靶面上,系统焦距为 500 mm,视场为 0.01°,全视场弥散斑 RMS 半径小于 10 μ m。激光发射系统通过两级透镜组及库德光路实现对 1 064 nm 激光的 18 倍扩束和发射。系统成功实现了合作目标与非合作目标的高成功率有效测距,针对目标集内的测距成功率达到 80% 以上。

关键词:空间目标;激光测距;光学系统;单光子探测器;视场;焦距

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A

doi:10.3724/OPE.20263417.2633

CSTR:32169.14.OPE.20263417.2633

Design of optical system for space target laser ranging

JIANG Xiwen*, ZHAO Yongzhi, LÜ Tianyu, CHEN Baogang, ZHOU Chao

(Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 13604331605@163.com

Abstract: To improve the orbit-determination accuracy of space targets and enhance spacecraft maneuver-avoidance capability, a design method for a laser-ranging optical system for space targets is investigated. A non-coaxial transceiver laser-ranging optical system comprising a primary optical system and a laser-transmitting system is proposed. The primary optical system employs a 700 mm-aperture Cassegrain configuration. Following initial image formation, collimation and beam splitting are performed to enable both target-monitoring imaging and echo-signal reception. The target-monitoring imaging subsystem operates over a wavelength range of 1 100-1 700 nm, with a focal length of 4 200 mm and a field of view of 0.18°; its image quality approaches the diffraction limit. In the echo-signal receiving subsystem, incident 1 064 nm radiation collected by the primary aperture is collimated into a 12 mm-diameter parallel beam and subsequently focused onto the 80 μ m active area of a single-photon detector through a lens group. This subsystem has a focal length of 500 mm and a field of view of 0.01°. The laser-transmitting subsystem achieves

收稿日期:2026-05-29;修订日期:2026-06-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12573087)

18× beam expansion and emission of a 1 064 nm laser beam through a two-stage lens group and a Coudé optical path. The overall system has been validated through multiple experiments, demonstrating effective and stable ranging of space targets.

Key words: space target; laser ranging; optical system; single-photon detector; field of view; focal length

1 引言

随着航天技术的快速发展,空间目标的轨道测定精度与航天器机动规避能力已成为空间态势感知与在轨安全保障的核心技术指标,激光测距凭借其测量精度高、抗干扰能力强等优势已成为空间合作目标精密定轨与非合作目标探测的关键手段^[1]。激光测距技术出现在上世纪六十年代,美国发射第一颗激光卫星“BEACON-B”并进行激光测距^[2],各国随后陆续开展对合作目标与非合作目标的激光测距。奥地利 Graz 站利用千赫兹激光测距系统对米级大小低轨空间碎片目标实现 0.7 m 的测距精度^[3]。澳大利亚的 Mt Stromlo 激光测距站采用 1.8 m 口径望远镜,成功实现对尺寸小于 10 cm 空间碎片目标的测距^[4-5]。在国内,上海天文台建设了 1.56 m/60 cm 双望远镜激光测距实验系统,成功获取合作目标与非合作目标的回波信号^[6-7],后续又采用高重频低功率激光测距系统实现对空间碎片目标的高精度测量^[8]。云南天文台利用 1.2 m 地平式望远镜实现对一些大型空间碎片如火箭箭体等漫反射激光测距^[9-10],2018 年使用 100 Hz,1064 nm 激光器在国内首次实现月球激光测距,并于 2025 年实现高重频月球激光测距^[11-12]。长春人造卫星观测站针对合作目标开展千赫兹激光测距技术研究,实现了合作目标的高精度定轨^[13-14]。中国科学院长春光机所于 2024 年利用 700 mm SDLR 望远镜系统,开展了对空间碎片激光测距回波特性仿真与试验分析研究^[15]。

空间激光测距的本质是利用地面观测系统对空间目标进行跟踪与对准,同时通过激光发射系统向空间目标发射脉冲激光光束,激光在大气中传播抵达空间目标后,经目标角反射器反射或表面漫反射后,按原路返回地面接收系统,微弱的光回波信号被转换为电信号,再通过硬件电路、时间测量模块和软件处理系统,精准测量出激光发射脉冲到返回脉冲的时间差。利用路程

＝速度×时间关系,计算出激光传输距离,再取一半即是地面测距系统到空间目标的真实距离。目前关于空间目标激光测距系统的研究多是围绕系统功能介绍、结构组成、软件数据处理、测距精度分析等方面展开,关于系统从光学原理角度出发的设计、分析方面仍没有深入探讨。针对以上情况,本文以某 700 mm 空间目标激光测距系统工程实例为研究对象,根据设计要求,对系统展开了详细的探测能力分析、光学设计、分析及像质评价,并在系统运行实验中详细介绍了系统实验过程与对应操作,最终成功实现空间目标的高效、稳定测距^[16]。

2 空间目标激光测距系统能力分析

在轨运行的空间目标,按照是否搭载专用激光角反射器可分为合作目标与非合作目标。其中,合作目标多为人造卫星、导航卫星、科学实验卫星及专用激光测距卫星等,该类目标测距反射率高,回波强,多用于精密定轨、大地测量;非合作目标多为无控失效载荷或空间碎片等,该类目标测距依靠壳体漫反射,回波信号弱,稳定性差,常用于空间碎片监测与空间安全防护。

反映合作目标激光测距能力的光子回波数方程^[17]为:

$$N_s = \frac{16 \cdot E_t \cdot \lambda \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{h \cdot c \cdot \pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2}, \quad (1)$$

其中: N_s 为探测器接收到的回波平均光电子数, E_t 为激光器单脉冲能量, λ 为激光波长, A_s 为目标有效反射面积, A_r 为接收系统的有效面积, K_t 为激光发射系统光学效率, K_r 为激光接收系统光学效率, T 为大气透过率, η 为接收探测器效率, α 为包含大气抖动、湍流等因素的影响因子, h 为普朗克常数, c 为光速, R 为目标距离, θ_t 为激光器激光发散角, θ_s 为目标角反射器发散角。

反映非合作目标激光测距能力的光子回波数方程^[18-20]为:

$$N_d = \frac{E_t \cdot \lambda \cdot A_d \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta \cdot \alpha}{4h \cdot c \cdot \pi \cdot R^4 \cdot \theta_t^2}, \quad (2)$$

其中: N_d 为探测器接收到的回波平均光电子数, A_d 为非合作目标反射横截面积,其余参数与公式(1)一致,因非合作目标没有角反射器,因此不需考虑角反射器发散角影响。

由公式(1)和公式(2)可知,无论合作目标与非合作目标,当被测空间目标、大气条件一定时,激光测距系统的能力与激光器的单脉冲能量、激光波长、接收系统的有效面积、激光发射与接收系统的光学效率、接收探测器效率等参数成正比,与激光器激光发散角的平方成反比。

当单脉冲平均回波光电子数 $N_d < 3$ 时,有效信号极易被噪声淹没,导致测距失效。现根据回波方程,以 $R=800$ km, $A_d=3$ m²低轨非合作碎片作为测距目标,选取波长为1 064 nm,单脉冲能量为2 J,发散角为0.5 mrad的测距商业激光器。取 $T=0.6$, $K_t=0.8$, $K_r=0.8$, $\eta=0.35$, $\alpha=0.75$,带入到 $N_d \geq 3$ 中,得到 $A_r \geq 1.99$ m²,换算到口径 $D \geq 1.59$ m,口径过大。考虑到制造成本,需对激光器进行扩束,扩束比取18,激光发散角为0.028 mrad,此时当望远镜口径取700 mm,系统完全具备测量 $R=800$ km, $A_d=3$ m²低轨非合作碎片能力,同等大小的合作目标,测距距离可达更高。

3 光学系统设计

根据上述分析结果,开展系统光学设计,系

统分为主光学系统和激光发射系统。主光学系统用于实现目标监视成像与回波信号接收;激光发射系统实现对激光的扩束与发射。

3.1 主光学系统设计

为满足系统高激光测距能力需求,主光学系统设计采用大口径卡塞格林结构形式^[21],主镜系统一次完善成像后再经准直透镜组准直、分色镜分光,分色镜反射后的1 064 nm光束经缩束透镜组缩束为12 mm细平行光束,再通过汇聚透镜组将光汇聚到高探测效率单光子探测器(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)。由于探测器灵敏度高,因此系统视场不宜过大,以免杂光噪声信号淹没有效信号,视场设计为0.01°;透过分色镜的1 100~1 700 nm光束经成像透镜组成像到目标监视成像系统,系统应具有一定的观测视场以满足被测目标的轨道预报精度偏差,同时要具备足够的单像元分辨率以满足目标的跟踪与对准精度,焦距设计为4 200 mm,探测器像元尺寸为15 μm,单像元分辨率为0.74",主要设计要求如表1所示。根据设计要求,进行该光学系统的具体设计:选择合适的初始结构,在此基础上缩放焦距,调整口径,设置基本参数,在光学设计软件中添加多重结构以适应不同系统的功能需求,添加必要的控制操作数,设置曲率、空气间隔、镜片厚度、材料等为变量进行优化,根据需要增加透镜和变量数,不断调整优化,直至像质满足要求,再通过反射镜对系统光路进行合理折转,最终光学系统的结构如图1所示。

表1 主光学系统的设计要求

Tab. 1 Design requirement of primary optical system

组成部分	口径	波段/nm	焦距/mm	视场/(°)	像质评价	环境温度/℃	探测器类型
回波信号接收系统	700 mm	1 064	500	0.01	弥散斑RMS半径<10 μm	-40~50	全靶面
目标监视成像系统		1 100~1 700	4 200	0.18	全视场MTF>0.4 @45.45 lp/mm		单像元 11 μm

针对设计展开像质评价,其中目标监视成像系统在20℃,奈奎斯特频率处(45.45 lp/mm),全视场为0.18°(对角线)的MTF均大于0.4,如图2所示。

系统的20℃点列图如图3所示,在全视场

0.18°范围内最大弥散斑半径(Root Mean Square, RMS)小于5 μm。

回波信号接收系统在20℃,0.01°全视场弥散斑RMS半径小于10 μm,如图4所示。

当环境温度发生变化时,热变形会导致光学

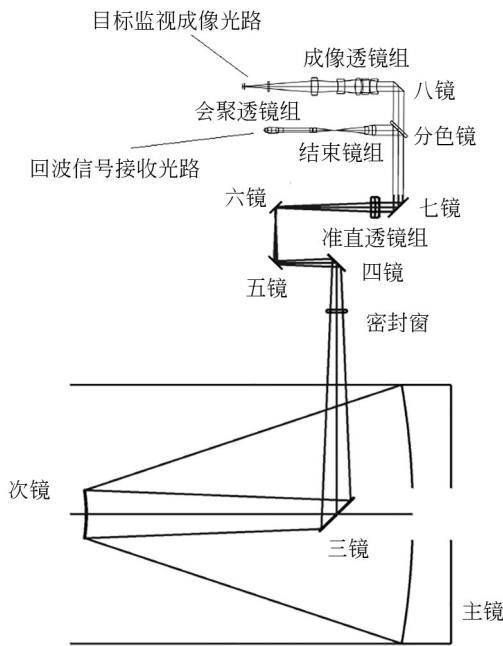


图1 主光学系统结构
Fig. 1 Structure of primary optical system

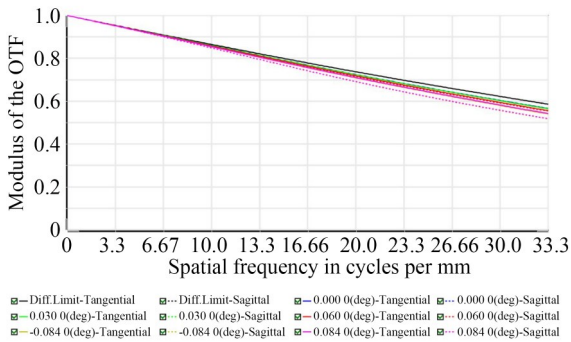


图2 目标监视成像系统 20℃时光学系统MTF曲线
Fig. 2 Target monitoring imaging system MTF curve at 20℃

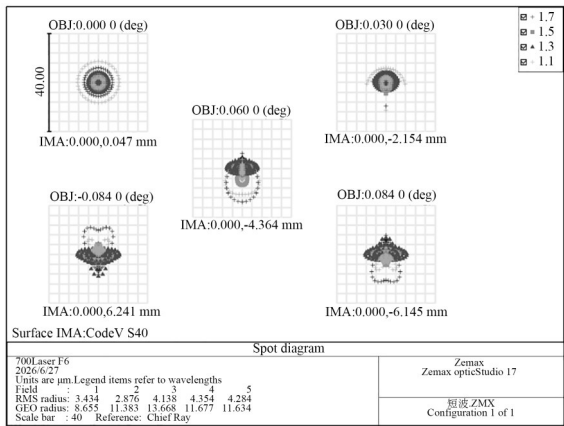


图3 目标监视成像系统 20℃时点列图
Fig. 3 Target monitoring imaging system spot diagram at 20℃

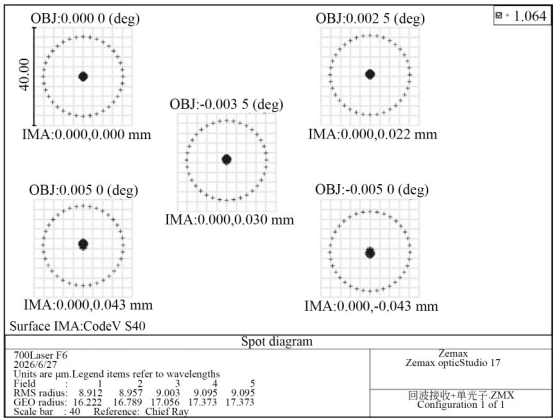


图4 回波信号接收系统 20℃时点列图
Fig. 4 Echo signal receiving system spot diagram at 20℃

表2 目标监视成像系统光学系统的补偿量
Tab.2 Compensation amount of the optical system of target surveillance imaging system

温度/℃	-40	-25	-10	5	20	35	50
补偿/mm	0.14	0.10	0.06	0.03	0	-0.05	-0.09

系统的成像质量下降,因此需要对系统进行温度补偿。对目标监视成像系统进行热分析后得知,通过后截距移动补偿,即采用移动探测器的方式可以实现温度补偿。经分析计算,像面移动的补偿为-0.09 mm~+0.14 mm,以15℃为梯度,不同温度的补偿量见表2。采用高精度双直线滚珠导轨电动平移台加步进电机驱动滑动丝杠带动探测器移动,可自锁,调焦范围为±15 mm,调焦精度为±0.01 mm。补偿后-40,50℃的光学系统的调制传递函数曲线分别如图5所示。由图可知,在-40~50℃内光学系统的MTF曲线全视场在45.45 lp/mm处均高于0.4,实现了系统像质的良好补偿。

回波信号接收系统具有其单一波长、小视场的特性,经热分析可知,系统的在-40~50℃全视场的弥散斑RMS半径差异不大,均在10 μm左右,因此系统无需温度补偿。

3.2 激光发射光学系统设计

激光发射系统对于激光测距能力的影响因素主要在于激光器单脉冲能量、激光波长、激光发散角以及整个发射系统的光学效率。为平衡成本与探测能力,选用单脉冲能量2 J的1 064 nm商用激光器作为激光光源,通过两级扩束透镜组完成对激光光斑的扩束,压缩发散角,同时

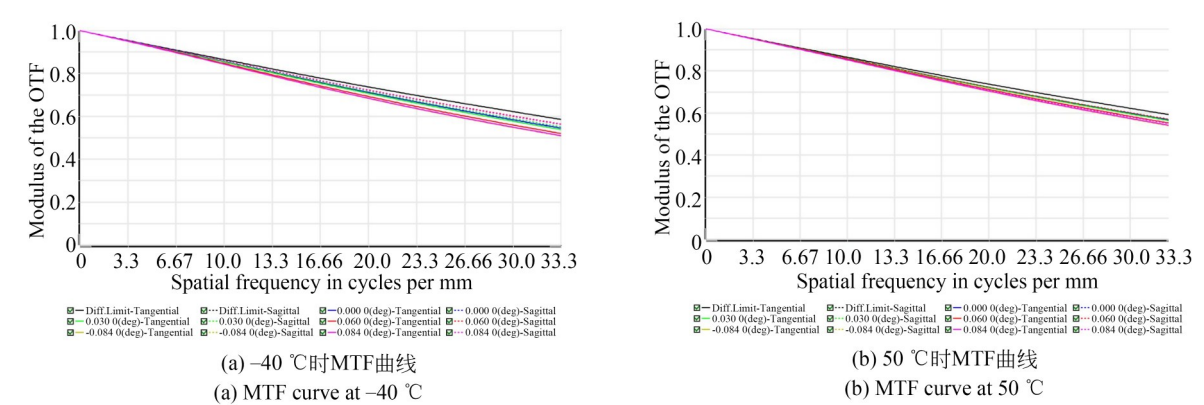


图 5 目标监视成像系统不同温度下光学系统的 MTF 曲线
Fig. 5 Target monitoring imaging system MTF curve at different temperatures

通过 1 064 nm 高反射率的反射库德光路实现激光发射光路与主光学系统的方位与俯仰转轴同轴,系统具体参数如表 3 所示。

表 3 激光发射系统设计参数	
Tab. 3 Laser transmitting system design parameters	
光学系统参数	参数值
激光器单脉冲能量/J	2
激光器重复频率/Hz	10
波长/nm	1064
激光器发散角/mrad	0.5
激光器出光斑/mm	10
一级扩束透镜组扩束倍率	3
二级扩束透镜组扩束倍率	6
扩束后激光发散角/mrad	0.028

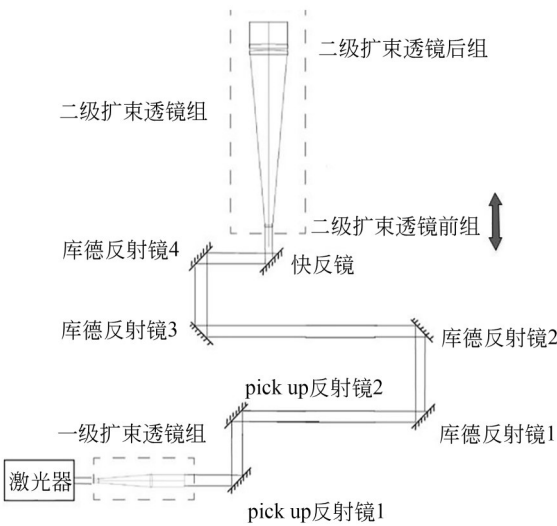


图 6 系统光路布局
Fig. 6 Layout of system optical path

系统光路布局如图 6 所示,其中两级扩束透镜组均采用伽利略扩束系统形式,无中间焦点,受激光器体积与使用环境的限制,激光器无法集成到机上,因此需通过多级 1 064 nm 高反射平面镜折叠库德光路将激光沿着主光学系统的方位、俯仰转轴同轴传播到机上,激光器发出的光通过 pick up 反射镜 1 与 pick up 发射镜 2 完成与整个库德光路的光轴对准。

组合后的无焦扩束系统像质接近衍射极限,波前为 $0.004\ 3\lambda$,系统 MTF 曲线图、波前图如图 7,图 8 所示。对激光发射系统进行 $-40\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热分析,当温度变化时,系统像质出现明显降低。经仿真分析得知,可以通过沿光轴方向移动二级扩

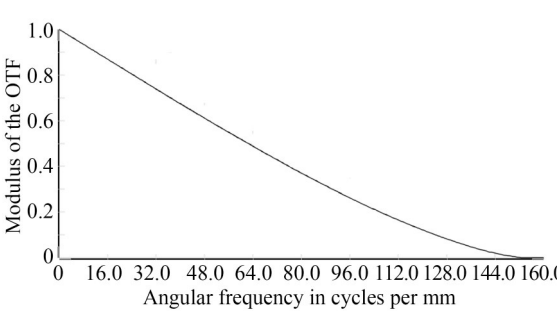


图 7 激光扩束系统 MTF 曲线
Fig. 7 MTF of laser expander system

束透镜组前组实现温度补偿,补偿量为 $-1.33\sim+0.63\text{ mm}$,详见表 4。采用高精度双直线滚珠

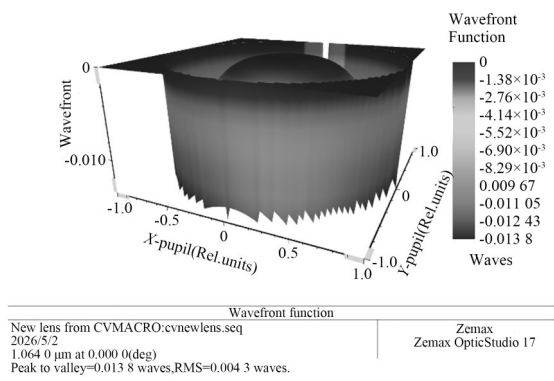
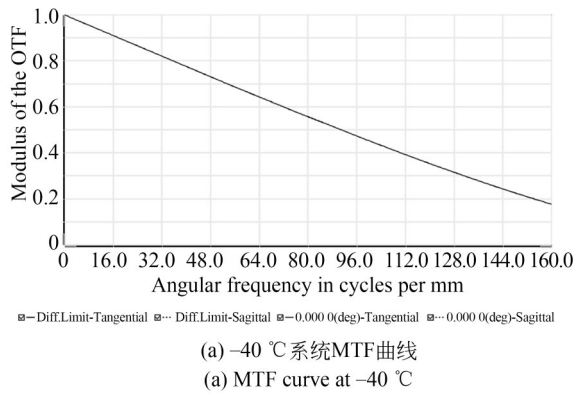


图 8 激光扩束系统波前

Fig. 8 Wavefront map of the laser expander system



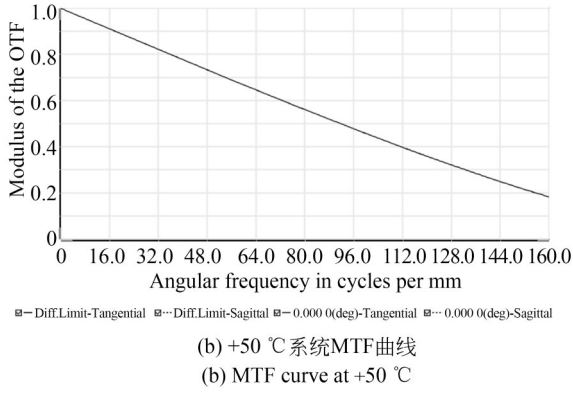
(a) -40 °C 系统MTF曲线
(a) MTF curve at -40 °C

导轨电动平移台加步进电机驱动滑动丝杠带动透镜移动,可自锁,调焦范围 ± 15 mm,调焦精度 ± 0.01 mm。 -40 °C与 $+50$ °C补偿后的MTF曲线如图9所示。

表 4 激光发射系统温度补偿二级扩束透镜移动量

Tab. 4 Temperature compensation of laser emission system and the movement of secondary beam expander lens

温度/°C	-40	-25	-10	5	20	35	50
补偿/mm	-1.33	-0.96	-0.65	-0.32	0	0.34	0.63



(b) +50 °C 系统MTF曲线
(b) MTF curve at +50 °C

图 9 激光发射系统不同温度下的 MTF 曲线

Fig. 9 Laser emission system MTF curve at different temperature

3.3 主光学系统与激光发射系统组合设计

在完成主光学系统与激光发射光学系统的设计后,需要考虑二者的组合光路布局,既要实现主光学系统与激光发射光学系统的光轴平行,又要满足激光光轴与主光学系统的方位、俯仰转轴同轴,两系统组合光路如图9所示。库德反射镜1、库德反射镜2、三镜均位于主光学系统方位转轴之上,通过调整库德反射镜1角度,使激光沿方位转轴传播。库德反射镜4、快反镜、三镜均位于主光学系统的俯仰转轴之上,通过调整库德反射镜4角度,使激光沿俯仰转轴传播。激光与转轴完成同轴后,其出射方向由快反镜决定,通过调整快反镜角度,使得激光出射后与主系统光轴同轴。由激光发射系统发射出的激光,到达被测目标后,被目标反射回来,被主系统接收,从而实现激光测距。

4 激光测距实验

激光测距过程中,载入被测目标的轨道模型预报,结合测距系统的站址坐标,引导伺服系统对目标进行跟踪。对于合作目标,预报准确程度很高;对于非合作目标,预报存在一定的偏差,因此要求目标监视成像系统具有一定的视场。由于目标监视成像系统的视场比回波信号接收系统的视场大很多,因此当目标成像系统捕获到被测目标时,需要调整系统的方位俯仰指向,将目标调整到回波信号接收系统的视场中心,即调整目标在成像系统相机靶面上的位置到系统的光轴上,即已装调好的相机靶面中心。此时发出激光,由于相机在1 064 nm波段具有响应,因此可以在看到被测目标的同时观察到由后向散射现象产生的激光光尖通过快反镜将激光光尖指向目标,如图10所示。

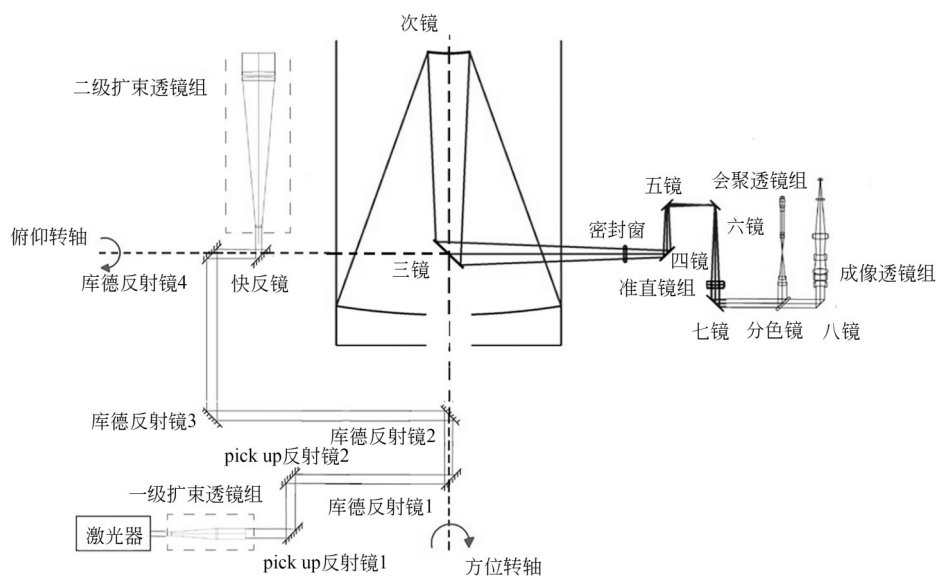


图 10 两系统组合光路

Fig. 10 Combined optical path of two systems

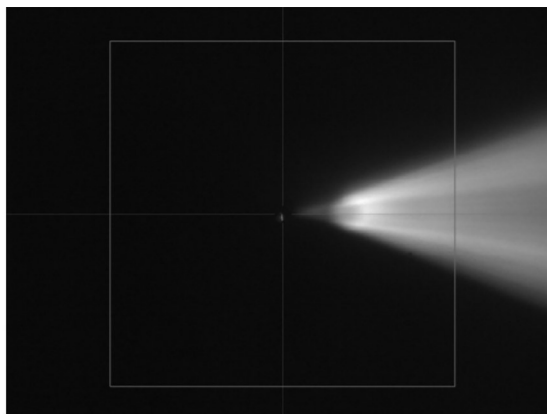


图 11 被测目标与激光图像

Fig. 11 Measured target and laser image

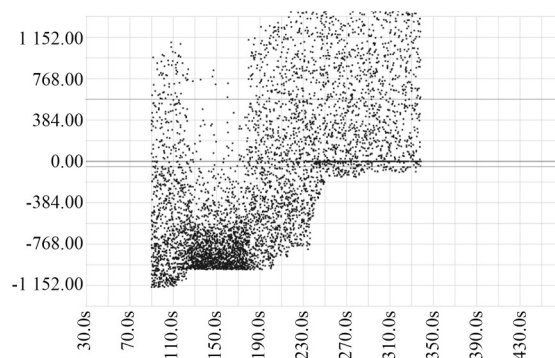


图 12 合作目标测距回波残差

Fig. 12 Range echo residual plot of cooperative target

保持激光与目标的对准,主光学系统中的回波信号接收系统收集回波光光子;经单光子探测模块将光子信号转为电脉冲信号;再经高精度时间测量与光子技术系统记录光子到达时间;数字信号处理系统对回波信号进行噪声抑制、峰值提取与距离结算;最终由显示与控制终端输出结果。

图 11 和图 12 分别为光学系统成功完成对合作目标与非合作目标测距后得到的回波残差图,其中横坐标代表观测时间序列,纵坐标 O-C 代表残差量,反映实际测量结果与理论轨道模型预测值偏差。可以看出,合作目标的测量结果与理论

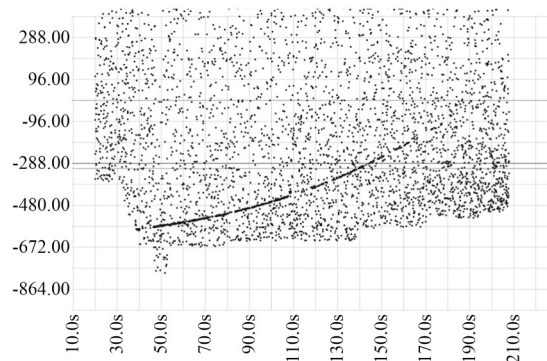


图 13 非合作目标测距回波残差

Fig. 13 Range echo residual of non-cooperative target

轨道模型高度吻合,非合作目标的测量结果与理论轨道模型存在较大偏差,因此激光测距系统对于验证合作目标轨道模型,修正非合作目标轨道模型、实现空间目标态势感知具有重大意义。对该 700 mm 测距系统运行实验进行统计,针对测距目标集内的目标测距成功率可达 80% 以上,测距效果良好。

5 结 论

本文研究了 700 mm 大口径激光测距系统的光学设计方法。利用光学设计软件,实现了系统中目标监视成像系统、回波信号接收系统及激光发射系统的详细设计与像质分析。其中,目标监

视成像系统全视场奈奎斯特频率 45.45 lp/mm 处 MTF 大于 0.4,像质接近衍射极限;回波信号接收系统全视场弥散斑 RMS 半径小于 10 μm 。激光发射系统实现激光光束高质量、高精度传输。系统成功实现了合作目标与非合作目标的高成功率有效测距,针对目标集内的测距成功率达到 80% 以上,具备较强的激光测距能力,对大口径激光测距光学系统的设计与应用具有借鉴意义。

作者贡献声明:

姜晰文:方案提出,论文构思与撰写;
赵勇志、陈宝刚:论文审核与修改;
吕天宇:实验设计及数据整理和分析;
周 超:实验数据记录与分析。

参考文献:

- [1] 王斌. 卫星激光测距系统的机架指向误差的研究[D]. 上海:中国科学院上海天文台, 2004.
WANG B. *Research on the Pointing Error of Telescope Mount in SLR System*[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [2] KUCHARSKI D, KIRCHNER G, SCHILLAK S, *et al.* Spin determination of LAGEOS-1 from kHz laser observations[J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(10): 1576-1581.
- [3] SANG J Z, SMITH C. Performance assessment of the EOS space debris tracking system[C]. *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Minneapolis, Minnesota*. AIAA, 2012: AIAA2012-5018.
- [4] YAO B C, WANG W T, XIE Z D. *et al.* Interdisciplinary advances in microcombs: bridging physics and information technology[C]. *eLight* 2024, 4: 19.
- [5] 张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. *科学通报*, 2011, 56(15): 1177-1183.
ZHANG ZH P, ZHANG H F, WU ZH B, *et al.* kHz repetition Satellite Laser Ranging system with high precision and measuring results[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(15): 1177-1183. (in Chinese)
- [6] 吴志波, 龙明亮, 张海峰, 等. 上海天文台近红外波长空间碎片激光测距研究进展[J]. *空间碎片研究*, 2020(4): 31-39.
- WU ZH B, LONG M L, ZHANG H F, *et al.* Progress of near infrared wavelength laser ranging to space debris at Shanghai astronomical observatory[J]. *Space Debris Research*, 2020(4): 31-39. (in Chinese)
- [7] 阳宇, 龙明亮, 张海峰, 等. 高海拔 1.2m 望远镜的瓦级皮秒激光空间目标测距研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(5): 696-702.
YANG Y, LONG M L, ZHANG H F, *et al.* A study of watt-scale picosecond laser space target ranging for a 1.2 m telescope at high altitude[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43(5): 696-702. (in Chinese)
- [8] 李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 160-164.
LI Y Q, LI ZH L, FU H L, *et al.* Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 160-164.
- [9] 翟东升, 伏红林, 何少辉, 等. 漫反射激光测距特性研究[J]. *天文研究与技术*, 2009(1): 13-19.
ZHAI D SH, FU H L, HE SH H, *et al.* Study on the characteristic of laser ranging based on diffuse reflection[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2009(1): 13-19. (in Chinese)
- [10] 李语强, 熊耀恒, 伏红林, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验[J]. *中国激光*, 2019(1): 8.
LI Y Q, FU H L, LI R W, *et al.* Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan Observatories[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019(1): 8. (in Chinese)

- [11] 张海涛,李祝莲,伏红林,等. 月球和地月空间卫星激光测距研究进展[C]. 2025年度中国卫星激光测距学术年会,2025. 11.
ZHANG H T, LI ZH L, FU H L, *et al.* Research progress in lunar laser ranging and cislunar space satellite laser ranging[C]. *2025 Annual Academic Conference on Satellite Laser Ranging in China*, 2025. 11. (in Chinese)
- [12] 梁智鹏,刘承志,范存波,等. 两行根数辅助的SLR单站定轨[J]. 天文学报, 2012, 53(2): 137-144.
LIANG ZH P, LIU CH ZH, FAN C B, *et al.* Two line element aided orbit determination using single station SLR data[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(2): 137-144. (in Chinese)
- [13] 董雪,韩兴伟,宋清丽,等. 空间碎片激光测距系统研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(A2): 35-40.
DONG X, HAN X W, SONG Q L, *et al.* Research of space debris laser ranging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(A2): 35-40. (in Chinese)
- [14] WANG J, ZHAO Y, GENG B. Impact of atmospheric turbulence on the signal intensity of the laser ranging echo of space debris[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(36):9268-9276.
- [15] ZHANG L, ZHANG C, ZHANG L, *et al.* A dual-mode LiDAR system enabled by mechanically tunable hybrid cascaded metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 287.
- [16] SMITH D E, TURCOTTE D L. *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics*[M]. Wiley, 1993.
- [17] 胡静静,刘静,崔双星,等. 地基光电望远镜对空间碎片探测能力的评估模型[J]. 光子学报, 2016, 45(10):122-127.
HU J J, LIU J, CUI SH X, *et al.* Evaluation model of detected ability for ground-based electro-optic telescope to space debris [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45 (10):122-127. (in Chinese)
- [18] 骆乐,吴长强,林杰,等. 基于光子计数激光雷达的时域去噪[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1175-1180.
LUO L, WU CH Q, LIN J, *et al.* Time-domain denoising based on photon-counting LiDAR [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1175-1180. (in Chinese)
- [19] 李明,薛莉,黄晨,等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 260-267.
LI M, XUE L, HUANG CH, *et al.* Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (2): 260-267. (in Chinese)
- [20] 姜晰文,赵金宇,吕天宇,等. 大口径主焦点式光学系统的设计与装调[J]. 光学精密工程, 2022, 30(23): 2987-2994.
JIANG X W, ZHAO J Y, LÜ T Y, *et al.* Design and alignment of large-aperture prime focus optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 2987-2994. (in Chinese)
- [21] 王来彬,周婷,刘东. 大口径望远镜大气探测激光雷达发展综述 [J/OL]. 大气与环境光学学报, 2026: 1-44. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.04.20260309.0956.002>.
WANG L B, ZHOU T, LIU D. Review of the development of atmospheric detection LiDAR for large aperture telescope [J/OL]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2026: 1-44. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.04.20260309.0956.002>. (in Chinese)

作者简介:



姜晰文(1991—),男,吉林长春人,硕士,2013年、2016年于长春理工大学分别获得学士学位和硕士学位,主要从事光学设计、光学检测方面的研究。
E-mail: 13604331605@163.com