

激光与光电子学进展

摆镜在 1.2 m 望远镜激光测距接收系统中的应用分析

李鹏飞^{1,2}, 翟东升^{1,3}, 李祝莲^{1,3*}, 李语强^{1,3}¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210023

摘要 在月球激光测距与空间目标白天激光测距中, 强烈的背景噪声会大幅降低测距成功率, 在云南天文台 1.2 m 望远镜激光测距系统的接收光路中加入可调视场光阑, 通过改变视场光阑孔径大小来调整接收视场, 可减少背景噪声。但受到速度光行差等因素的影响, 在接收视场减小到几个角秒时, 回波会被光阑挡住无法通过, 探测器接收不到回波信号。为解决这一问题, 提出在视场光阑前加入二维偏转摆镜的方法, 控制摆镜偏转使偏离的回波通过光阑中心被探测器正常接收。以高轨卫星和同步轨道卫星为目标, 测量了回波信号偏离视场中心的角度值, 并仿真分析了使用摆镜校正偏离角度值的效果。结果表明, 该方法可以在小视场激光测距时快速高精度校正回波信号, 可为满月时月球激光测距与空间目标白天激光测距提供支持。

关键词 仪器; 测量与计量; 激光测距; 接收系统; 摆镜; 仿真分析

中图分类号 P111.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222006

Application Analysis of Tip/Tilt Mirror in 1.2 m Telescope Laser Ranging Receiving System

Li Pengfei^{1,2}, Zhai Dongsheng^{1,3}, Li Zhulian^{1,3*}, Li Yuqiang^{1,3}¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, Yunan, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Key Laboratory of Space Object & Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract Strong background noise can considerably reduce the probability of ranging success in lunar laser ranging and space target daytime laser ranging. The 1.2 m telescope laser ranging system of Yunnan Observatories uses an adjustable field diaphragm in the receiving light path to reduce the background noise by changing its aperture size. However, because of velocity aberrations, when the receiving field of view is reduced to a few arcseconds, the echo is blocked by the aperture and the detector does not receive the echo photon. To address this problem, a method of adding a two-dimensional tip/tilt mirror in front of the field diaphragm is proposed. The tip/tilt mirror can allow the deviated echo to be received by the detector through the aperture center. The deviating angles of the echo are measured by observing some high-orbit satellites and geostationary satellites. Additionally, the effect of using the tip/tilt mirror to correct the deviation angles is simulated and analyzed. The results show that this method can quickly and accurately correct the deviating angles of the echo in laser ranging with a small field of view and can provide support for lunar laser ranging at full moon and space target daytime laser ranging.

Key words instrumentation, measurement, and metrology; laser ranging; receive system; tip/tilt mirror; simulation analysis

1 引言

云南天文台 1.2 m 望远镜建于 20 世纪 80 年代, 是

当时国内口径最大的地平式天文光学望远镜, 从 1996 年开始在该望远镜上建立了激光测距系统, 1997 年开始观测向美国国家航空航天局(NASA)等国际组织提供

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-08-03; 录用日期: 2022-09-05; 网络首发日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(12033009)、国家自然科学基金(U1431116)

通信作者: *lzh@ynao.ac.cn

观测资料,并转向常规观测^[1]。2009年,郑向明等^[2]在该望远镜上建立和实现了kHz共光路常规卫星激光测距系统;2010年,又实现了10Hz共光路空间碎片激光测距^[3];2017年,该研究团队在原有10Hz共光路空间碎片激光测距系统的基础上,建立了10Hz共光路激光测距系统并获得了月面反射器的测距回波数据^[4]。可见,云南天文台1.2m望远镜激光测距平台具备较好的探测性能。为了进一步发掘该望远镜的探测能力,实现白天空间目标激光测距以及满月期间甚至白天月面反射器激光测距等,除了高精度激光瞄准外,还需要高性能的测距接收系统^[5-6]。

月球激光测距是通过精确测量激光脉冲从地面测站到月面角反射器阵列的飞行时间来计算地月距离^[7]。地球与月球之间的平均距离约 3.84×10^5 km,距离遥远导致月球激光测距接收到的回波光光子数非常稀少,只有单光子水平,容易被背景噪声淹没^[8]。云南天文台在2018年1月22日成功实现月球激光测距,但在满月附近几天内还没有接收到月面角反射器回波信号,强烈的背景噪声是重要原因。1.2m望远镜月球激光测距接收系统使用了可变视场光阑来调节接收视场大小以减少背景噪声,背景噪声越强,光阑直径调得越小,接收视场也就越小^[4]。空间目标白天激光测距将存在更强的背景噪声^[9],仅使用滤光片已不满足要求,亦通过减小视场光阑直径来滤除背景噪声。实际观测中发现,该方法能有效抑制进入接收系统的背景噪声,然而在减少背景噪声的同时会带来另一个问题,回波信号也被挡在了接收视场之外从而不能有效探测回波光光子。

为了使被挡在视场光阑之外的回波光光子能进入接收视场,本文提出使用摆镜控制激光测距回波光束在接收系统中指向的方法,并对应用摆镜后的接收光路进行了仿真分析。

2 1.2 m 望远镜激光测距接收系统

2.1 接收光路

云南天文台1.2m望远镜激光测距系统是共光路方式,收/发转换由转镜实现,转镜两侧开孔,发射激光时,通过转镜小孔出射,接收回波时,转镜旋转将回波光束反射到单光子探测器接收光路中。图1为1.2m望远镜激光测距系统光路图,回波光束通过望远镜主光路后进入库德房,由分光镜分为两路,一路经扩束系统和转镜后进入单光子探测机箱,其中窄带滤光片用于滤掉与回波波长不同的噪声信号,可变视场光阑用来改变接收视场大小,减小接收视场可滤掉大部分背景噪声;另一路在互补金属氧化物半导体(CMOS)相机上成像,用于监测可见的观测目标。单光子探测器接收视场中心与CMOS相机接收视场中心通过室内激光或恒星等光源来调试对准。

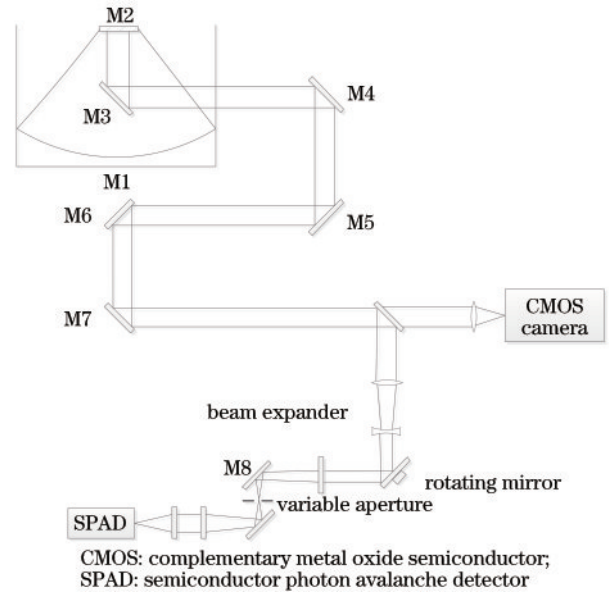


图1 1.2 m 望远镜光路图

Fig. 1 Optical path of 1.2 m telescope

2.2 接收视场

接收视场 θ 可由下式计算得到:

$$\theta = d / (f \times n), \quad (1)$$

式中: d 为视场光阑直径,范围为0.15~4 mm; f 为透镜焦距; n 为扩束倍数,经望远镜主副镜和扩束系统扩束后,总扩束倍数为41.7。

在视场光阑孔径开到最小时,接收视场最小,即直径为0.15 mm时,最小接收视场为1.43",但视场光阑直径开到一定大小后不再具有调节接收视场的作用,这时接收视场由探测器决定,即最大接收视场^[10]。半导体光子雪崩探测器(SPAD)靶面尺寸为500 μ m,计算最大接收视场需考虑探测器前两面透镜,焦距分别为520 mm和185 mm,总扩束倍数为 $41.7 \times (520/185) = 117.21$,代入式(1)可得最大接收视场为73.3",该视场对应视场光阑孔径为7.7 mm,超过光阑孔径最大值4 mm,4 mm直径对应的视场大小为38"。因此,1.2 m望远镜接收视场大小完全由视场光阑所开直径决定,范围为1.43"~38"。视场光阑直径连续可调。表1给出了部分视场光阑直径与视场角的对应关系。统计了望远镜对准月面、视场光阑分别开到1.53、2.20、

表1 视场光阑直径与视场角的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between field aperture and field angle

Aperture / mm	Field of view / (")
0.15	1.43
1.00	9.50
1.50	14.20
2.00	19.00
2.50	23.80
3.00	28.50
4.00	38.00

2.68 mm 时的背景噪声,每秒平均背景噪声计数分别为 12.5、14.5、15.9,如图 2 所示。光阑直径从 2.68 mm

减小到 1.53 mm 时,背景噪声减少了 22%。

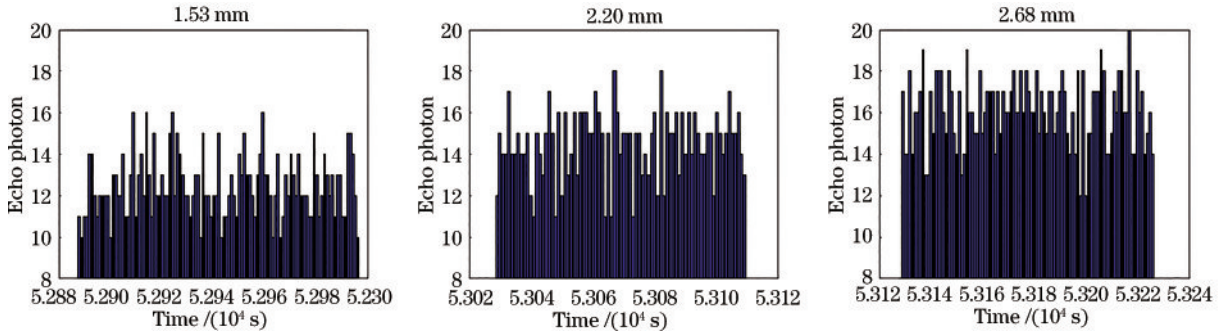


图 2 不同光阑直径对应的背景噪声

Fig. 2 Background noise corresponding to different aperture diameters

3 回波信号在接收视场中的分布

月球激光测距、卫星或空间碎片白天测距时背景噪声很强,往往通过减小视场光阑来减少背景噪声,此时接收视场通常只变小几个角秒,受大气湍流、望远镜跟踪误差、速度光行差等因素的影响,小视场时回波信号将偏出接收视场。其中,大气湍流和望远镜跟踪误差影响较小,在望远镜跟踪稳定时,误差小于 1",速度光行差是主要因素。速度光行差是当角反射器随着高速运动的空间目标运动时,入射光线被角反射器反射后光线方向略有变化而不再沿着原路返回,图 3 为最大速差、最小速差随轨道高度的变化关系。从图中可以看出,速度光行差会使经角反射器后的回波光束偏离,并且偏离值随轨道高度增大而减小。为了测试回波信号在视场变小后是否还能顺利进入接收视场以及回波信号偏离视场的角度值,对激光测距卫星进行了观测实验。

对 glonass 系列、compass 系列、qzs 系列等多颗卫星(20000 km 左右的高轨卫星和 36000 km 的同步轨道卫星)进行激光测距,测试方法为:卫星在接收系统 CMOS 相机里的像调到 CMOS 相机视场中心,视场光

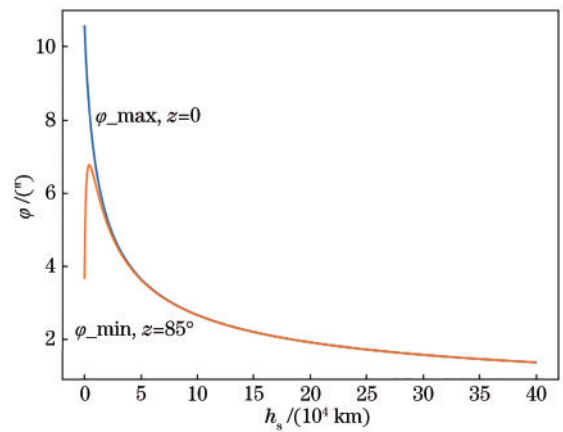


图 3 最大、最小速差与轨道高度的关系

Fig. 3 Relationship between maximum and minimum velocity aberrations and orbit height

阑调到最小,激光能量设置最小后,开始测距,测距过程中再改变视场光阑大小,直到出现较强回波信号,此时光阑直径对应的视场大小即为回波信号的偏离量,如图 4 所示。图 4(a)为小孔直径在整个天区的分布,点的大小代表视场角大小,也即偏离量,图 4(b)和 4(c)分别是偏离量随方位角和高度角的变化。

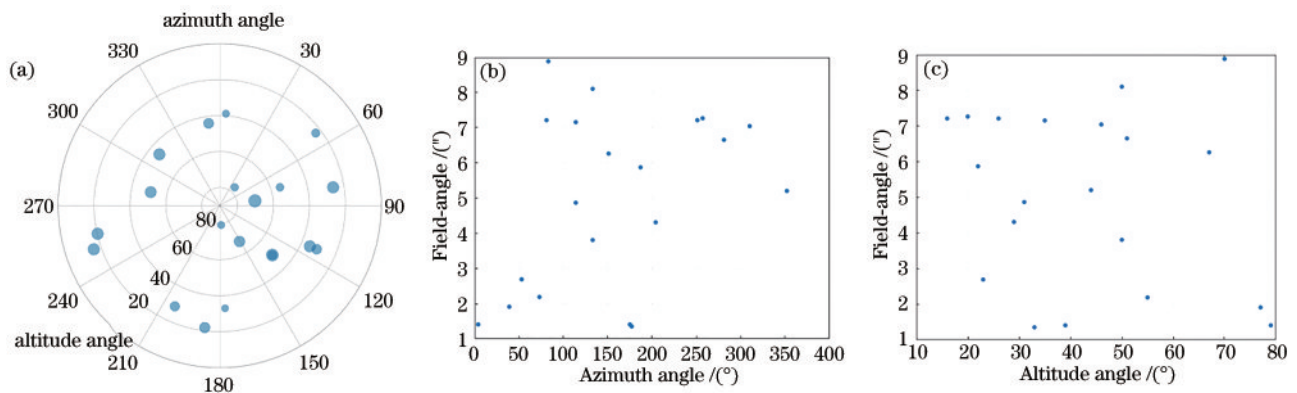


图 4 回波偏离量测量结果。(a)偏离量测量结果;(b)偏离量随方位角的变化;(c)偏离量随高度角的变化

Fig. 4 Echo deviation measurement results. (a) Deviation measurement results; (b) variation of deviation with azimuth angle; (c) variation of deviation with altitude angle

从图 4 可见,光阑直径增大到一定值后才能接收到回波信号,回波光不是总能回到视场中心,就观测的这些高轨卫星和同步轨道卫星而言偏差在 9" 以内。根据表 1,此时小孔光阑直径约为 1 mm,如果此时继续减小视场光阑直径,则必然使得有些目标的回波光被挡在外面。

4 摆镜在接收光路中应用可行性分析

摆镜又称快速反射镜,可通过控制器控制驱动元件来推动反射镜绕两轴偏转,调整光束传播方向,目前广泛应用于激光通信、自适应光学、图像稳定等领域^[11-12]。摆镜具有精度高、分辨率高、响应速度快等优

点,因此这里将其设计应用于 1.2 m 望远镜接收光路中,用于回波光束方向修正。具体思路是:使用摆镜代替接收光路中的反射镜(图 1 中平面反射镜 M8),在回波光束到达视场光阑前校正回波光束指向,确保探测器接收到回波信号。

4.1 1.2 m 望远镜接收光路仿真

为验证使用摆镜调整回波信号指向的使用效果,这里先使用 Zemax 软件仿真搭建了 1.2 m 望远镜激光测距光路系统,并将图 1 接收光路中的 M8 换为摆镜,通过摆镜两个轴的偏转来调整回波光束,使回波信号全部通过视场光阑聚焦在探测器上,图 5 为接收系统仿真光路图。

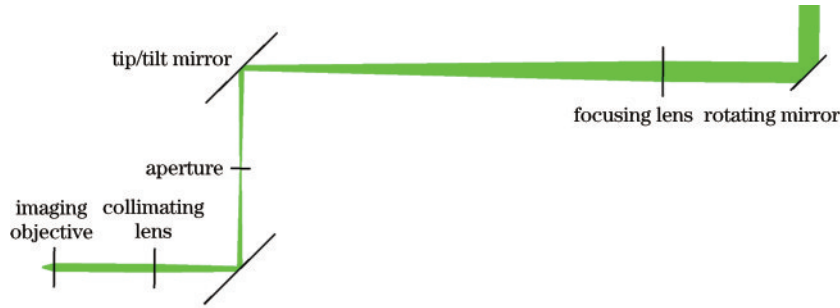


图 5 接收系统仿真光路图

Fig. 5 Simulation optical path diagram of receiving system

图 5 中为云南天文台 1.2 m 望远镜激光测距系统回波光束经过扩束系统后的部分,以平行光入射经反射镜(即图 1 中的转镜)后进入接收系统,经聚焦透镜和摆镜后在视场光阑处聚焦,透过视场光阑后经反射镜和准直透镜变为平行光,最后聚焦在探测器焦平面上。接收系统中有两面反射镜,由于观测过程中视场光阑会开到很小,如果摆镜位于视场光阑后,可能会出现回波偏离角度过大无法通过光阑的情况,导致摆镜无法发挥作用,因此,仿真过程中将视场光阑前的反射镜设计为摆镜,通过调整该反射镜在光路中的角度来模拟摆镜的使用效果。表 2 为仿真光路接收部分的设计参数。

表 2 光路设计参数

Table 2 Optical path design parameters unit: mm

Parameter	Value
Spot size	0.025
Tip/tilt mirror diameter	50
Aperture diameter	0.15-4.00
Focusing lens focal length	520
Collimating lens focal length	185
Imaging objective focal length	12

4.2 仿真结果分析

根据 2.2 节的接收视场计算结果,摆镜所能调整的视场范围需大于 38",目前压电陶瓷二维摆镜行程

多为 5 mrad,该角度的等效接收视场为 49.4",满足系统要求,因此仿真分析中使用的摆镜行程为 5 mrad。图 6 为摆镜在零位时,光斑中心点在探测器靶面的位置。

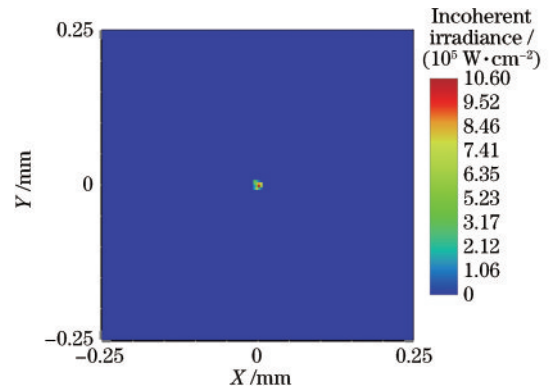


图 6 摆镜在零位时的光斑位置

Fig. 6 Spot position with tip/tilt mirror at zero

图 6 中亮点为光斑位置,整个靶面范围 X 方向和 Y 方向分别为 0.5 mm,以探测器尺寸值为坐标,中心为零点,摆镜位于零位时,光斑位置坐标为(0.004, -0.003)。

为验证摆镜对校正回波信号指向的效果,将入射光偏转一定角度,使回波入射光偏离光轴,再偏转摆镜对应的轴使回波对准探测器中心,光路中摆镜的 X 轴、Y 轴分别与光源的 X 方向、Y 方向对应,记录光源偏离

与摆镜校正后的光斑坐标值。根据第 3 节的测量结果,回波偏离角度多在 9° 以内,表 3 为仿真结果。从仿真结果可以看出,在入射光偏离光轴后,光斑在探测器

靶面上的坐标也偏离中心,经过摆镜校正后,光斑可回到探测器中心位置。

表 3 摆镜校正回波指向仿真结果

Table 3 Simulation results of tip/tilt mirror correcting echo direction

X direction angle of light source /($^\circ$)	Y direction angle of light source /($^\circ$)	Spot coordinate	X direction angle of tip/tilt mirror /($^\circ$)	Y direction angle of tip/tilt mirror /($^\circ$)	Spot coordinate
0	0	(0.004, -0.003)	0	0	(0.004, -0.003)
3	0	(0.004, 0.0203)	62.55	0	(0.003, -0.003)
6	0	(0.003, 0.0408)	125.10	0	(0.004, -0.003)
9	0	(0.0003, 0.0612)	250.20	0	(0.004, -0.002)
0	3	(0.0204, -0.004)	0	62.55	(0.003, -0.003)
0	6	(0.0408, -0.002)	0	125.10	(0.003, -0.004)
0	9	(0.0611, -0.003)	0	250.20	(0.004, -0.004)

在空间目标白天激光测距和满月激光测距时,为减少背景噪声,通常会把视场光阑开到很小,与最大 9° 的回波信号偏离值相比,小视场会导致探测器接收不到回波,而利用摆镜高精度、高分辨率的特点可以将偏出的回波光束调整回视场中心,提高测距成功率。该方法对白天测距和满月激光测距是有效的。

5 结 论

月球激光测距与空间目标白天激光测距中,通常使用减小视场光阑直径的方法来减小接收视场从而降低背景噪声的影响。从 glonass、compass、qzs 等多颗高轨卫星的观测结果来看,接收视场减小到 9° 以下时,有些目标的回波信号就会偏离视场无法被探测到。为此本文提出在视场光阑前使用二维摆镜来修正回波光束方向的方法,减小其偏离中心的角度值,直到回波光束进入接收视场或接收视场中心,以提高测距成功概率。经过仿真分析,入射光偏离光轴一定角度后,摆镜可以调整回波光束的指向使其通过小孔回到探测器中心位置,该方法可以在小视场时快速高精度地调整回波信号。后续还需确定实际观测中摆镜的调整角度值,待 1.2 m 望远镜升级改造完成后,可以将摆镜用于接收系统中,在满月激光测距与空间目标白天激光测距等小视场条件下提高测距成功率。同时,该方法也可应用于测距系统设计和测距系统探测效率的提高。

参 考 文 献

- [1] 熊耀恒,伏红林. 云南天文台 1.2 m 望远镜的光学系统[J]. 光电工程, 1998, 25(S1): 66-69.
Xiong Y H, Fu H L. Optical system of the Yunnan Observatory 1.2 m telescope[J]. Opto-Electronic Engineering, 1998, 25(S1): 66-69.
- [2] 郑向明,李祝莲,伏红林,等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.

- Zheng X M, Li Z L, Fu H L, et al. 1.2 m telescope satellite Co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
- [3] 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): 0908001.
Li Y Q, Li Z L, Fu H L, et al. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 0908001.
- [4] 李语强,伏红林,李荣旺,等. 云南天文台月球激光测距研究与实验[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104004.
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, 46(1): 0104004.
- [5] 李祝莲,翟东升,汤儒峰,等. 基于 532 nm 波长的空间碎片白天激光测距研究与试验[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1112003.
Li Z L, Zhai D S, Tang R F, et al. Research and experiment on space debris daytime laser ranging based on 532 nm wavelength[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1112003.
- [6] 李祝莲,翟东升,张海涛,等. 基于超导探测器的白天卫星激光测距试验与研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 20190536.
Li Z L, Zhai D S, Zhang H T, et al. Superconductivity detector applied to daytime satellite laser ranging experiment and research[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(8): 20190536.
- [7] Chabé J, Courde C, Torre J M, et al. Recent progress in lunar laser ranging at Grasse laser ranging station[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(3): e2019EA000785.
- [8] Murphy T W, Adelberger E G, Battat J B R, et al. The apache point observatory lunar laser-ranging operation: instrument description and first detections[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2008, 120(863): 20-37.
- [9] 谢庚承,叶一东,雒仲祥,等. 飞行目标脉冲激光测距的回光稳定性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091207.
Xie G C, Ye Y D, Luo Z X, et al. Light echo stability of pulsed laser ranging of flight targets[J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091207.
- [10] 张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 地基空间碎片激光测距技术发展与应用(特邀)[J]. 光子学报, 2020, 49(11): 1149004.
Zhang H F, Long M L, Deng H R, et al. Development and application for ground-based space debris laser ranging(invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(11): 1149004.
- [11] Hugi S, Maillard T, Baillus A, et al. Fine steering mirror based on piezo actuators: a point ahead mechanism (PAM30) for deep space optical communication module of the psyche mission[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11852: 118525N.
- [12] 倪迎雪. 空间激光通信 APT 系统中快速反射镜关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018: 20-22.
Ni Y X. Research on key technologies of fast mirror in APT system of space communication[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 20-22.