

卫星激光测距中接收光路光机结构设计

韩光宇^{1,2}, 张国玉¹, 曹立华^{1,2}, 陈 宁², 于晓波^{1,2}

(1 长春理工大学 长春 130022; 2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要: 在卫星激光测距过程中,需要在跟踪卫星的同时完成激光测距,为了能够实现全天候的测距工作,白天卫星激光测距的探索具有重要的意义。对中、高轨卫星测距时,反射回来的激光能量非常少,因此必须采用大口径的望远镜进行接收。在研制某型号卫星激光测距的项目中,为了保证 MEO、GEO 和 IGSO 的成功测距,选用口径为 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 的主光系统,在第一像面前采用分光棱镜光谱分光的形式,实现了跟踪卫星和激光测距任务的同时完成,并且扩展了白天光束监测光路,使系统具备了全天候测距功能。实践证明,光学系统成像质量良好,机械结构设计合理、紧凑,成功地实现了对中、高轨卫星的测距。

关键词: 光学系统; 卫星激光测距; 主镜支撑

中图分类号: TN216 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Opto-mechanical structural design of receiving opto-mechanical system in SLR

Han Guangyu^{1,2}, Zhang Guoyu¹, Cao Lihua^{1,2}, Chen Ning², Yu Xiaobo^{1,2}

(1 Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In satellite laser ranging, tracking satellite and laser ranging need to be done simultaneously. In order to realize all-weather ranging, exploring day-time laser ranging is of great importance. In the ranging of MEO and GEO, the energy of the reflected laser is quite little, so large-calibre receiving telescope is used. In the project of developing a certain model satellite ranging system, to ensure the successful ranging of MEO, GEO and IGSO, a $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ primary optical system is used. Through splitting the spectrum with a dispersion prism in front of the first image plane, tracking satellite and laser ranging are done simultaneously, and the day-time light beam monitoring optical system is expanded and the system is capable of all-weather ranging. Experiments show that this optical system has good image quality, and reasonable and compact mechanical structure, which achieves the purpose of ranging MEO and GEO.

Key words: optical system; SLR; primary mirror bracing

1 引 言

美国航空航天局在 1964 年 10 月发射了第一颗带有激光反射镜的 BE-B 卫星,并成功地首次测定了地球和该颗卫星之间的距离,开创了地球对卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)的新纪元。目前,包括我国在内

的 SLR 站点共有 40 多个地面站分布在全球各地。SLR 是一种重要和实用的技术。它对于检测大陆板块移动、地壳形变、地球自转和极移,改进地球重力场和地心引力常数,精密卫星定轨,确定地球和海洋潮汐变化的规律等方面都具有重要作用。例如重力场方面,由全球几十个跟踪站对 LAGEOS 卫星的联测,精化了表征地球的形状和大小的参数以及地心引力常数等;在地球自转方面,确

定地球自转参数,精度和分辨率都比用经典技术的测定提高了很多倍。利用 SLR 精确测定极移两分量和地球自转速率变化或日长变化,其精度分别达到 0.1 毫角秒、0.2 毫角秒和 0.05 毫角秒。

SLR 的原理是测量激光脉冲根据地面参考点到卫星之间的往返时间间隔,从而计算出卫星到地面参考点的距离。具体讲,首先地面跟踪站的计算机系统根据预报准确计算出卫星的位置,通过伺服控制系统驱动望远镜跟踪卫星,激光器通过望远镜上的激光发射光路发射脉冲激光,卫星上的后向反射器将激光反射,并由望远镜接收光路接收脉冲激光,与此同时,时间间隔计数器测出激光脉冲往返时间间隔,以此时间乘以光速,即可精确地计算出卫星到地面跟踪站的距离。

由此可见,在 SLR 的光机系统中,激光发射光路和接收光路是其 2 个重要的组成部分。在激光接收光路中,常采用大口径的望远系统接收由卫星反射回来的激光脉冲,口径越大,接收能量就越多,探测距离也就越远。

本文根据研制的某激光测距项目具体任务要求,对激光接收光路的光机结构设计进行了较为详细的论述。

2 主要技术要求

根据 SLR 系统的总体技术指标要求,激光接收光学系统需要接收卫星角反射器反射回来的激光脉冲(波长 532 nm),其中绝大部分的激光回波进入测距光路,完成对 MEO、GEO 和 IGSO 卫星的测距。剩余部分的激光回波和可见光其他波段进入卫星跟踪光路,用来进行跟踪卫星和监视发射光束。同时利用此系统探索白天激光光束监测和白天测距。

3 光学系统方案设计

根据技术要求可知,接收望远系统需要具备卫星激光测距、卫星跟踪和白天光束监测能力。因此需要设计 3 个光路,分别完成相应的功能。

3.1 接收望远系统口径确定

根据常用的激光雷达测距方程:

$$N_s = \frac{16ESA_s A_r K_r K_t T^2 \eta \alpha}{\pi^2 \theta_r^2 \theta_s^2 R^4} \quad (1)$$

式中: N_s 为接收探测器接收到的平均光子数, E 为发射的激光脉冲能量(J), S 为每焦耳能量的激光所含光子数, A_s 为卫星反射器的有效面积(m^2), A_r 为接收望远镜的有效接收面积(m^2), K_r 为接收光学系统的效率, K_t 为发射光学系统的效率, T^2 为大气双程透过率, η 为接收探测器器件的量子效率, α 为衰减因子, θ_r 为发射激光束的发散角(rad), θ_s 为卫星角反射器的发散角(rad)。经过计算,

当望远系统接收口径选取 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 时,对于 GEO 和 IGSO 卫星, $N_s = 4.4$ 光子;对于 MEO 卫星, $N_s = 18.5$ 光子。

由于 GEO 卫星距离地面的高度为 36 000 km,从卫星返回地面的激光非常微弱。所以要求光电接收转换器件必须具有极高的灵敏度和极快速的响应特性。目前国内常用的是带有时间游动补偿功能的单光子雪崩二极管 C-SPAD 作为光电接收探测器,通过采取有效抑制背景噪声,提高信噪比等措施,可以满足测距要求。

3.2 焦距选择

根据三路光学系统所选用的光电探测器接收靶面尺寸,利用式(2)计算各路光学系统的焦距:

$$f' = \varphi / 2 \tan \omega \quad (2)$$

式中: f' 为光学系统焦距(mm), φ 为探测器靶面大小(mm), ω 为有效视场角(rad)。经过计算可确定,激光测距接收系统焦距 4 000 mm,卫星跟踪系统焦距 8 000 mm,白天光束监测系统焦距 8 250 mm。

3.3 光学系统设计

根据 SLR 接收光学系统的技术要求,需要采用主系统光谱分光的方式,又由于每一路光学系统的探测器尺寸和焦距不同,要采用二次成像的方式才能满足使用要求。

经过计算可知,接收望远镜的光学系统是长焦距、大口径的光学系统,主光学系统必须采用反射式结构形式。常用的反射式主要有 2 种结构:卡赛格林式和牛顿式。在卡赛格林式光学系统中,光学元件均采用非球面,不利于加工和装调,但是具有仪器结构紧凑,回转半径和转动惯量小的优点。牛顿式结构有光学元件易于加工的优点,但是系统结构相对庞大,回转半径和转动惯量均较大。根据本项目的实际要求,选用卡赛格林式主光学系统。

从图 1 可以看到,主光学系统采用卡赛格林式结构,在第一像面前采用分光棱镜进行光谱分光,其中大部分的波长为 532 nm 的激光回波透射过分光棱镜进入激光测距系统;激光测距系统成像质量如图 2 所示。其余波段的可见光和少量剩余的激光回波反射进入卫星跟踪系统,卫星跟踪系统成像质量如图 3 所示。当需要白天进行激光测距时,将反射镜、恒温槽和窄带滤光片切入激光测距系统的光路里,经过反射镜,将接收的激光回波反射到白天光束监测系统。窄带滤光片是白天测距能否实现的关键器件,工作时将其放置在恒温槽内,保证透射过窄带滤光片的激光的中心波长保持恒定;当调整好激光发射光束时,迅速将反射镜退出光路,由 C-SPAD 接收激光回波,实现白天测距。

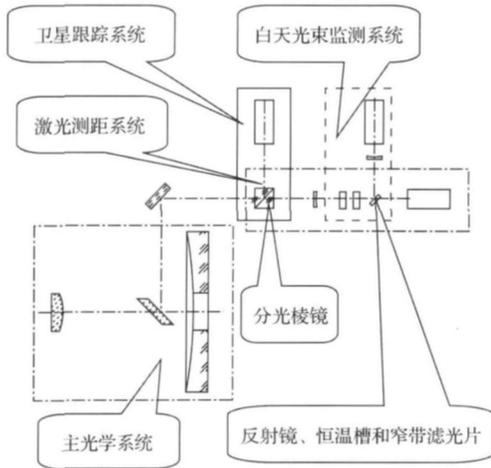
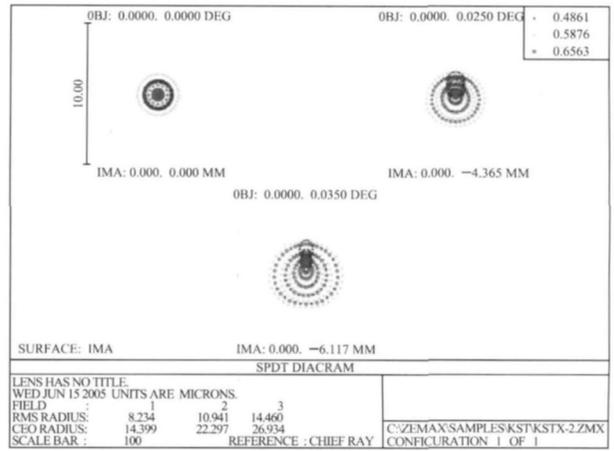
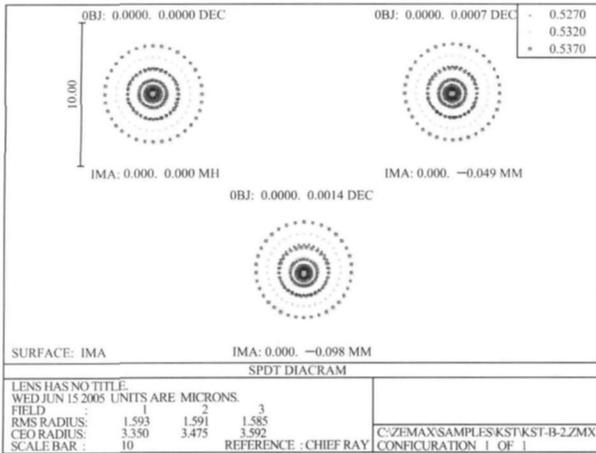


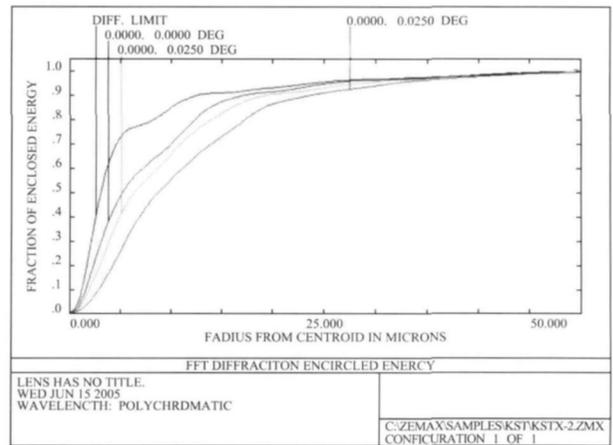
图1 光学系统图
Fig. 1 Optical system layout



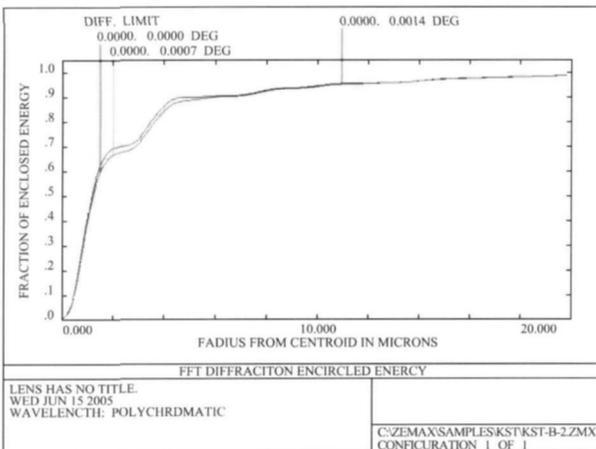
(a) 光学系统的点列图
(a) Spot diagram



(a) 光学系统的点列图
(a) Spot diagram



(b) 光学系统的能量集中度曲线
(b) FFT diffraction encircled energy



(b) 光学系统的能量集中度曲线
(b) FFT diffraction encircled energy

图2 激光测距系统
Fig. 2 Laser ranging system

图3 卫星跟踪系统

Fig. 3 Satellite tracking system

根据以上光学设计,系统具备了激光测距和卫星跟踪的功能,并且兼顾了白天光束监测的需求,光学系统成像质量良好,满足技术指标要求。

4 机械结构设计

在进行接收光路机械结构设计时,首先要满足光学系统中光学元件的间距和排布要求,并在此基础上保证机械结构具有足够的刚度和强度,保证光学系统在调试过程中的便捷性,与整机的协调性和美观性。

4.1 主光学系统结构设计

在接收望远系统中,主光学系统是最重要的组成部分,其成像质量的好坏,直接影响第一像面后各光学系统的成像质量,而对主光学系统光学元件(即主镜和次镜)

的机械支撑,是至关重要的。

为了减小温度梯度对主镜面形精度的影响,主镜选用热膨胀系数较小的微晶玻璃,通光口径是 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 。如图 4 所示。在工作过程中,主镜需要围绕旋转轴 O 相对于重力场在俯仰角 $\alpha = -90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内作相对运动。要设计合理的机械支撑结构,控制主镜上力的分布,当重力方向相对与主镜发生变化时,使光学表面变化最小,主镜面形精度最好。根据主镜的运动方式,通常设计成中心轴定位、轴向支撑和径向支撑组合的方式;当 $\alpha = 0^\circ$ 时,只有轴向支撑起作用,当 $\alpha = 90^\circ$ (或 -90°) 时,只有径向支撑起作用,当 α 在其他角度时,两种支撑同时起作用。

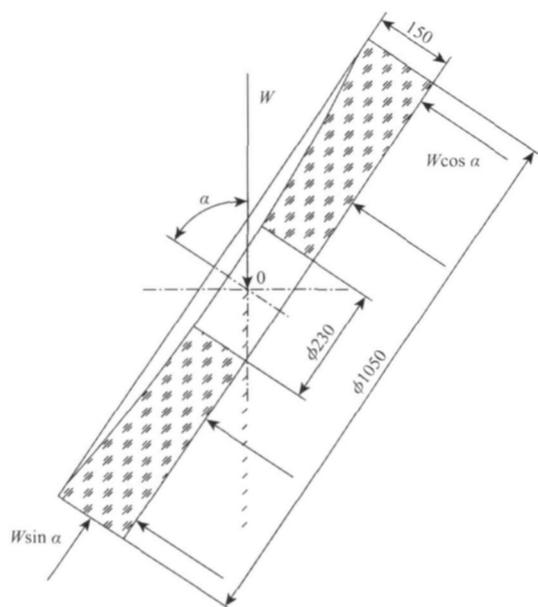


图 4 主镜受力示意图

Fig. 4 Sketch diagram of the stressed primary mirror

对该主镜的轴向支撑采用 18 点支撑方案,当 $\alpha = 0^\circ$ 时,主镜的全部重量均由轴向的 18 个支撑点承担。径向支撑采用在主镜上下两个半圆周面上分别安装 3 个柔性的重锤式支撑方式。当 $\alpha = 90^\circ$ (或 -90°) 时,主镜的全部重量均由下圆周面径向的 3 个支撑点承担。18 个轴向支撑点和 6 个径向支撑位置通过有限元进行了分析优化。支撑结构如图 5 所示。

次镜位于主镜前端,与主镜构成卡赛格林式光学系统,为了满足主光学系统视轴的稳定性和较小的遮拦比,其支撑结构不仅要保持足够的刚度,还要尽量减小对主光路的遮挡。经过有限元的优化分析,设计时采用了四叶架式支撑结构,次镜遮拦比为 6.6%,四叶架式支撑结构遮拦比大约 2%。次镜支撑形式如图 6 所示。

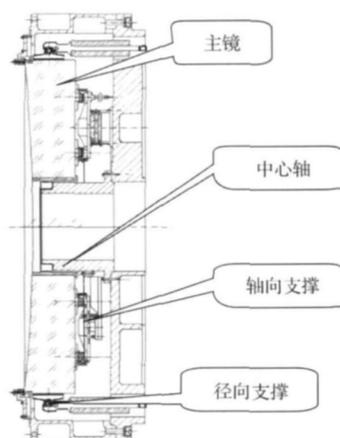


图 5 主镜支撑结构

Fig. 5 Bracing structure of the primary mirror

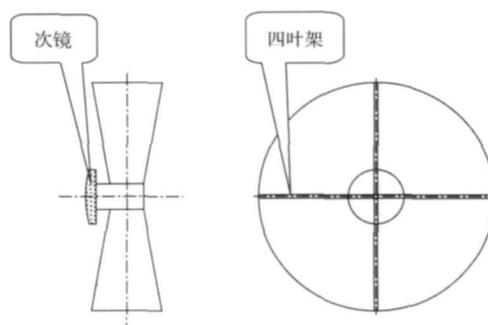


图 6 次镜支撑形式

Fig. 6 Bracing type of the secondary mirror

4.2 接收小系统结构设计

接收小系统结构比较简单,从图 1 可以看到,经过 2 块 45° 反射镜,将主系统接收的可见光和激光回波反射进入分光棱镜进行光谱分光,经分光后少量的激光回波和其余波段的可见光进入卫星跟踪系统;大部分波长为 532 nm 激光经过准直透镜后进入 C-SPAD 探测器进行激光测距;当将白天光束监测系统中的反射镜、窄带滤光片和恒温槽切入光路时,完成白天光束监测,切出其中的反射镜,即完成白天的激光测距,此光路中反射镜和恒温槽、窄带滤光片均放置在移动平台上,通过驱动平台上的步进电机实现移动。

5 实际验证

5.1 过程检验

采用放大率法检测光学系统的焦距。即将装调好的光学系统放置在大口径的平行光管前,在平行光管物镜的焦面上放置分划板,在光学系统的焦面上通过测微目镜测量像的尺寸,并根据已知的平行光管的焦距计算出

光学系统的焦距。经过测量各光学系统焦距均满足指标要求。

5.2 外场验证

激光发射光机结构与接收望远系统进行了整机集成,并与激光器系统对接调整完成后,在外场分别对中、高轨目标卫星进行测距,在稳定跟踪的同时,成功地完成了的测距任务,完全能够满足系统的指标要求。

6 结 论

根据工程的技术指标和性能要求,重点对激光测距、卫星跟踪和白天光束监测的光学系统进行了较为详细的设计与分析。同时对主光学系统的机械结构做了详细的论述。该系统采用光谱分光的形式使得3个光学系统共用一个主光学系统,机械结构紧凑。不仅成功地保证了系统的指标要求,也为同类型的设备做了一点借鉴。

参考文献

- [1] 刘基余. 60年距离测量的演变[J]. 海洋测绘, 2010, 30(2): 74-78.
LIU J Y. The Distance measurement evolution in 60 years [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(2): 74-78.
- [2] 赵赞, 潘峰, 王茂磊, 等. 一种应用于卫星导航定位系统的SLR系统架构与实现[J]. 激光与红外, 2010, 40(3): 241-245.
ZHAO Y, PAN F, WANG M L, et al. SLR system framework and design based on satellite navigation position system [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 241-245.
- [3] 江洁, 王昊予, 张广军, 等. 一种大视场姿态角传感器的光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 68-72.
JIANG J, WANG H Y, ZHANG G J, et al. Optical system design for large FOV attitude angle sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 68-72.
- [4] 李祝莲, 熊耀恒, 何妙禅, 等. 云南天文台人造卫星激光测距系统原理[J]. 天文研究与技术(国家天文台刊), 2008, 5(3): 248-252.
LI ZH L, XIONG Y H, HE M CH, et al. Principle of 1.2 m telescope satellite laser ranging system [J]. Astronomical Research & Technology, 2008, 5(3): 248-252.
- [5] 郎琪, 邹昕, 王文生. 折反式坦克目标跟踪识别红外光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 575-579.
LANG Q, ZOU X, WANG W SH. Design of catadioptric infrared optical system for tank target tracking and recognition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 575-579.
- [6] 卫志斌, 瞿锋, 程伯辉. 卫星激光测距仪光学接收系统的改造和设计[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 125-126.
WEI ZH B, QU F, CHENG B H. The transformation and design of the SLR receiving system [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(3): 125-126.
- [7] 赵春梅, 瞿锋, 程鹏飞, 等. 阿根廷圣胡安激光测距系统的SLR数据质量分析[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 338-341, 348.
ZHAO CH M, QU F, CHENG P F, et al. Data quality analysis of Argentina San Juan laser ranging system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 338-341, 348.
- [8] 赵有, 刘乃苓. 卫星激光测距的发展和现状[J]. 测绘通报, 1999(12): 23-26.
ZHAO Y, LIU N L. Satellite laser ranging: status and development [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1999(12): 23-26.
- [9] 张国玉, 张帆, 徐熙平, 等. 小型准直式红外地球模拟器研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(3): 545-549.
ZHANG G Y, ZHANG F, XU X P, et al. Research on a miniature collimating infrared earth simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 545-549.
- [10] 黄林昊, 廖学兵, 谢正喜, 等. 激光光束质量对远程激光测距精度影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊2): 1219-1221.
HUANG L H, LIAO X B, XIE ZH X, et al. Study on the influence of the laser beam quality on the precision of long-range laser ranging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Suppl. 2): 1219-1221.
- [11] 严奉轩, 郭唐永, 王培源, 等. SLR应用展望—伽利略计划和非合作目标跟踪[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 118-121.
YAN F X, GUO T Y, WANG P Y, et al. Prospect of application of SLR—On Galileo plan and debris tracking [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(3): 118-121.
- [12] 徐灏, 邱宣怀. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
XU H, QIU X H. Machine design hand book [M]. Beijing: Publishing House of Mechanical Industry, 1992.
- [13] 高皓, 刘清华, 赵赞, 等. 卫星激光测距系统控制分系统设计及实现方法[J]. 现代导航, 2010, 3: 7-10.
GAO H, LIU Q H, ZHAO Y, et al. Design and implementation method of main control system in satellite laser [J]. Modern Navigation, 2010, 3: 7-10.
- [14] 孙芳方, 陈宁, 乔彦峰. 光电经纬仪中激光测距装置光学系统设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(6): 878-880.

SUN F F ,CHEN N ,QIAO Y F. Optical design of emitting device of laser range on electro-optical theodolite [J]. Semiconductor Optoelectronics ,2007 ,28 (6) : 878-880.

- [15] 项清革 ,卫志斌 ,程伯辉 ,等. 卫星激光测距仪发散角系统的设计 [J]. 测绘科学. 2004 29(5) : 44-46.

XIANG Q G ,WEI ZH B ,CHENG B H ,et al. Design of divergence system of satellite laser ranging [J]. Science of Surveying and Mapping 2004 29(5) : 44-46.

作者简介



韩光宇 ,1995 年毕业于长春大学 ,2004 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位 ,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员 ,主要研究方向为光学精密机械设计。

E-mail: hanlamost@ 163. com

Han Guangyu graduated from Changchun University in 1995.

He received his M. Sc. degree from Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences in 2004. He is currently an associate research fellow in Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics. His main research focuses on the design and study of optics and fine mechanics.



张国玉(通讯作者) ,分别于 1984、1990 年和 2005 年在长春理工大学获得学士硕士和博士学位 ,现为长春理工大学博士 ,主要研究方向光电仪器与检测技术。

E-mail: zh_guoyu@ yahoo. com. cn

Zhang Guoyu (Corresponding author) received B. Sc. in 1984 , M. Sc. in 1990 and Ph. D. in 2005 all from Changchun University of Science & Technology. He is currently a professor in Changchun University of Science & Technology. His main research focuses on the opto-electrical instruments and testing technology.