

文章编号:1001-5078(2025)02-0275-06

· 光电技术与系统 ·

## 激光通信与测距一体化系统研究

王爽<sup>1</sup>, 温冠宇<sup>2</sup>, 吕泽群<sup>2</sup>, 王贺<sup>1</sup>, 韩兴伟<sup>2</sup>, 王刚<sup>1</sup>

(1. 吉林交通职业技术学院 机械工程学院, 吉林 长春 130000;  
2. 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 激光测距研究室, 吉林 长春 130022)

**摘要:**随着深空探测、卫星导航等领域的发展,基于激光通信的卫星通讯网和基于激光测距的高精度定位等技术已经取得了大量的应用成果。将激光通信与激光测距结合在一起,实现通信测距一体化已成为领域的研究热点。本文介绍了国内外激光通信测距一体化的发展现状,然后结合国内现状,提出了一种具有空间碎片探测能力的激光通信与测距一体化系统设计方案。为验证方案的可行性,在长春站原1米激光通信望远镜系统上进行了改造,增加了空间碎片目标的测距能力,实测数据表明,有效数据精度最高优于1m。最后对未来激光通信与测距一体化系统发展方向进行了展望,旨在为进一步推动激光通信与测距一体化研究的发展提供借鉴思路。

**关键词:**激光测距仪;激光通信;激光测距;一体化系统

**中图分类号:**P228.5;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.017

## Research on the integration of laser communication and ranging

WANG Shuang<sup>1</sup>, WEN Guan-yu<sup>2</sup>, LV Ze-qun<sup>2</sup>, WANG He<sup>1</sup>, HAN Xing-wei<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jilin Communication Polytechnic, Changchun 130000, China;  
2. Changchun Satellite Observation Station, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** With the development of deep space exploration, satellite navigation and other fields, such as satellite communication networks based on laser communication and high-precision positioning based on laser ranging have achieved a large number of application results. Combining laser communication with laser distance measurement to achieve the integration of communication and ranging has become a research hotspot in the field. In this paper, the development status of laser communication and ranging integration at home and abroad is introduced, and then a design scheme of laser communication and ranging integration system with space debris detection capability is proposed in the light of the current situation in China. In order to verify the feasibility of the scheme, the original 1-meter laser communication telescope system in Changchun Station is modified to increase the ranging capability of space debris targets, and the measured data show that the effective data accuracy is better than 1 m at the highest. Finally, the future development direction of integrated laser communication and ranging system is prospected, aiming to provide ideas for fur-

**基金项目:**吉林省中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(No. 20220508147RC);吉林省教育厅项目(No. JJKH20251781KJ);吉林交通职业技术学院科学研究重点项目(No. KY2024-1-1);校企横向课题项目(No. 2024HX01)资助。

**作者简介:**王爽(1986-),女,硕士,副研究员,吉林省高层次人才,主要从事光通信领域、仪器科学与技术、机器人领域等方面的研究。E-mail:wshuang@jiljy.edu.cn

**通讯作者:**温冠宇(1985-),男,博士,副研究员,吉林省高层次人才,吉林省创新创业人才,主要从事激光通信测距领域。E-mail:wengy@cho.ac.cn

**收稿日期:**2023-12-26; **修订日期:**2024-02-06

ther promoting the development of integrated laser communication and ranging system.

**Keywords:** laser range finder; laser communication; laser ranging; integrated system

## 1 引言

激光通信是以激光为载体进行语音、图像和数据等信息传输的技术。与射频通信相比,激光通信频率高 4~5 个数量级,这使得激光通信具有通信容量大、系统体积小、通信带宽大、能量高度集中和发射功率低等优点。激光通信已经成为解决微波通信速率瓶颈的有效手段,被认为是星间、星地和深空场景下进行高速数据传输的最佳方式,具有很大的军用和民用潜力<sup>[1-7]</sup>。激光测距技术是利用激光对目标的距离进行准确测定的一种技术,具有测量精度高、抗干扰性强等优点,是最早和最广应用于军事的激光技术<sup>[8-11]</sup>。随着激光通信和激光测距技术的不断发展,激光通信和激光测距的结合可以为卫星、飞机和地面站等平台实现激光通信和测距等多种功能,具有巨大的应用前景<sup>[12-13]</sup>。

## 2 激光通信与测距一体化技术发展现状

国外自 20 世纪 60 年代中期开展空间激光通信技术研究以来已取得重大研究成果。2013 年 9 月,美国发射月球大气和尘埃环境探测航天器进行月地激光通信在轨实验。航天器上搭载了月球激光通信星载终端,上行信号采用 4 PPM 调制、速率为 20 Mbit/s,下行信号采用 16 PPM 调制、速率为 622 Mbit/s,工作波长为 1.55  $\mu\text{m}$ 。

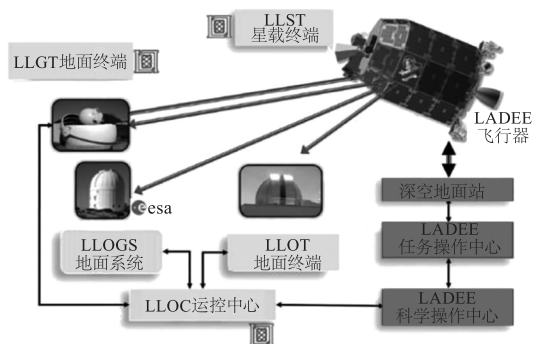


图 1 美国月球激光通信验证系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of the lunar laser communication verification system

2005 年,NASA 实验室提出了 SLR2000 系统的改造设想,利用 SLR2000 激光测距机的测距激光作为激光通信的信标光用于目标跟踪瞄准,为 SLR2000 的卫星激光测距系统增加了激光通信功

能,实现了卫星对地面的双向激光通信测距,为激光通信测距一体化提供了理论依据。

我国激光通信测距技术起步较晚。2014 年,国际光电技术与应用研讨会上提出了一种适用于激光通信与测距一体化系统的激光光源系统。第二年,长春理工大学根据星间链路特性,基于现有激光通信和测距技术提出了一种应用相干探测与数据帧相结合的测通体制。2021 年,吉林大学提出了一种基于双 PIM 的激光测距和通信同时实现的方法。实验结果表明,该方法获得的测距数据与直接 TDC 测距数据精度基本相同,数据传输结果较好<sup>[14]</sup>。2023 年,中国西南电子技术研究所为解决传统微波通信速率与测量精度难以同时进一步提升的问题,提出了一种光载波下基于调相体制的高精度测距、测距与通信一体化方法,并进行了原理样机的测试<sup>[15]</sup>。

目前激光通信和测距一体化技术在国内较为成熟,各研究机构陆续提出了复合系统的设计方案,并进行了原理样机的测试,可技术方案在设计之初并未考虑如何对非合作目标(空间碎片)进行测距。在未来可能会出现对空间碎片目标进行测距的情况。因此,将空间碎片目标的测距能力加入系统设计方案,可完善激光通信和测距一体化技术并增加其应用领域。

## 3 激光通信与测距一体化系统设计方案

激光通信测距一体化技术,包括激光通信技术和激光测距技术,同时具有以上两种功能,并在体积和重量上实现轻量化、小型化的设计。本文提出的激光通信与测距一体化系统设计方案具有空间碎片的测距能力,以及对合作目标的通信和测距能力。

### 3.1 光学结构设计

为了降低激光通信测距一体化系统光学结构的复杂性,合理安排系统收发结构,设计了激光通信发射/接收分系统、激光通信信标光与激光测距接收分系统、激光通信测距一体化光源系统结构,并且增加了具有观测普查功能的观靶相机。方案将原本需要六个光学系统的结构设计简化成四个光学系统,大大降低了光学系统的复杂性,有利于一体化的集成。总体结构方案如图 2 所示。

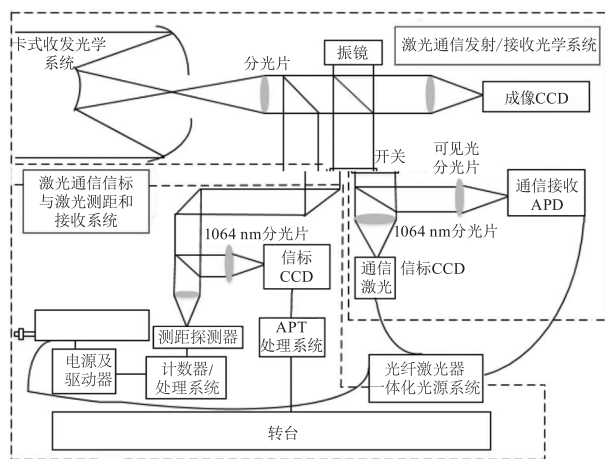


图2 总体结构方案图

Fig.2 Overall structure schematic diagram

### 3.2 接收结构设计

激光通信信标光和激光测距接收子系统由测距信标光学系统、分光片、激光测距探测器、衰减片、信标接收 CCD、激光测距数据处理系统组成,如图3所示。激光通信信标光和激光测距接收子系统由于目标的不同设计了非合作目标的工作模式。

发射测距信标激光,直接对反射回来的激光进行接收,通过分光片分光再由激光测距探测器接收,最后由激光测距数据处理系统实现激光测距。

为了使接收到的脉冲信标光满足跟踪要求,在信标接收端使用 CCD 跟踪相机来接收信号,工作频率 50 Hz,曝光时间设置为 2 ms,周期内其余时间用于将数据传输给处理器。发射端激光的重复频率为 1 kHz,在 CCD 相机曝光时间内每 1 ms,CCD 相机就能接收到一个脉冲,这样就可以通过 CCD 相机对激光光斑进行连续的跟踪。图3为激光通信信标与激光测距系统示意图。

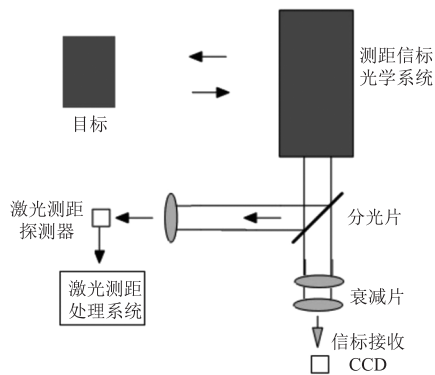


图3 激光通信信标与激光测距系统

Fig.3 Laser communication beacon and laser ranging system

## 4 激光通信与测距一体化系统改造及结果分析

对长春站原有的 1 m 激光通信望远镜进行了改造。在望远镜上增加了对空间碎片进行激光测距的功能后,可使该望远镜系统同时具备对空间碎片目标进行激光测距和对合作目标进行通信与测距的功能。为此,分别对长春站 1 m 望远镜的发射系统和接收系统进行了改造。

### 4.1 发射系统改造

原有的 1 m 激光通信望远镜主要用于星地链路实验,为实现空间碎片激光测距功能,需要对激光发射系统进行改造。空间碎片目标对激光的反射属于漫反射,回波光光子数少,为提升空间碎片探测成功率,需加大激光的发射功率,为此,更换了大功率激光器,大功率激光器主要技术指标如表 1 所示。

表 1 大功率激光器主要技术指标

Tab.1 Main technical indicators of high-power lasers

名称	参数
波长/nm	532
重复频率/Hz	500
输出功率/W	30
脉冲能量	60 mJ/500 Hz@532 nm
脉冲宽度/ns	10 ~ 12
光束质量( $M^2$ )	< 1.5

同时,激光发射功率过大,会对光路中的镜片造成损伤。我们应用了高精度的 45° 平面反射镜,该镜镀有高抗损伤的 45° 全反射膜,在防止激光对镜片造成损伤的同时提高了激光的有效传输效率,充分压缩激光束发散角,提高了激光的准直性。改造后的发射光路如图 4 所示。

### 4.2 接收系统改造

为实现空间碎片激光测距功能,在原有通信系统基础上,通过分光改造,增加了空间碎片的回波探测器。为应对空间碎片激光测距回波光光子数少的问题,在接收终端搭载了可进行单光子探测的 C-SPAD 探测器,其主要优点是灵敏度高、测时精度高、量子效率高、带有门控电路和时间游动补偿电路,可提升空间碎片目标回波光子的探测成功率。同时,对空间碎片目标进行观测时,探测器会受到大量背景噪声影响。为提升信噪比,在接收链路中应用了空间滤波和光谱滤波技术来降低噪声。接收终

端实物图如图 5 所示。

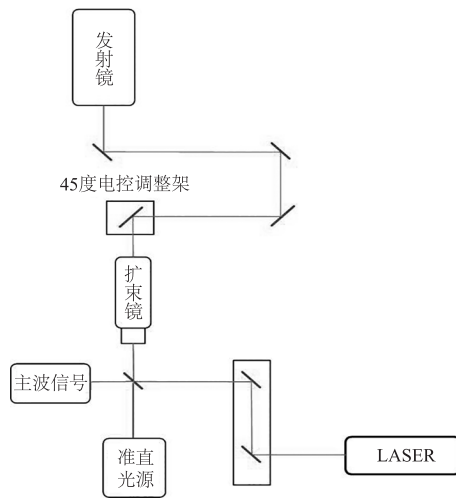


图 4 发射光路示意图

Fig. 4 Diagrammatic sketch of emissive light path

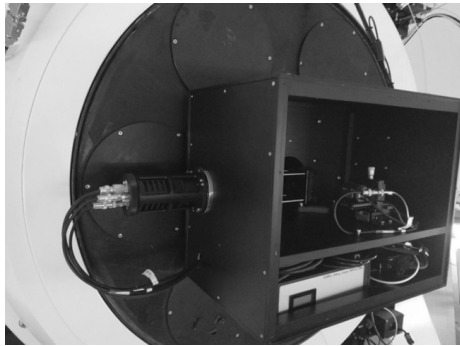


图 5 接收终端实物图

Fig. 5 Receiving terminal diagram

#### 4.3 跟踪系统改造

对空间碎片目标进行激光测距首先需要获取其预报,确定其位置。但一般情况下,空间碎片目标的预报精度较差,小视场 CCD 难以对其进行跟踪。需要大视场导星系统获取其初始角度数据。大视场导星镜口径 300 mm,波段 450 ~ 900 nm,视场  $1^\circ \times 1^\circ$ 。图 6 为大视场导星系统实物图。CCD 导星系统的天文定位技术可获得空间碎片目标的精确测角数据,利用高精度的位置偏差信息,改进目标的初轨预报精度。图 7 为距离偏差解算时间过程图。距离偏差在开始半分钟内呈现较大跳动,三分钟内逐渐收敛到接近真实值,稳态误差保持在 100 m 左右。为了进一步提升空间碎片目标的探测成功概率,缩短目标的搜索时间,本文利用图像处理方法得到目标位置与视场中心的偏差值,反馈到系统中修正激光的指向,使计算机获取目标的新位置,控制伺服系

统重新进行目标跟踪<sup>[16]</sup>。同时,低噪声探测器有助于增加探测器距离门的有效时间,可以解决现有空间碎片目标激光测距系统中预报偏差大的问题。



图 6 大视场导星系统实物图

Fig. 6 Large field guiding telescope

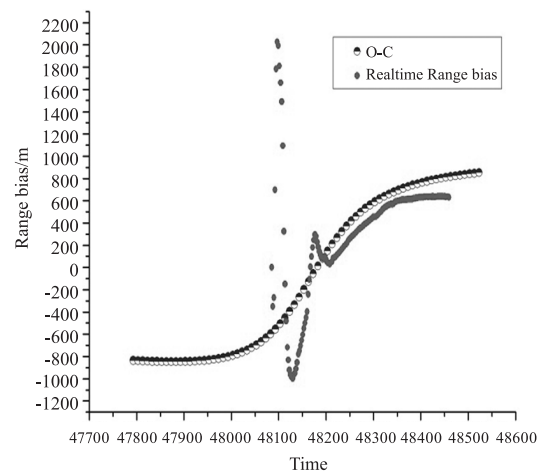


图 7 目标视位置解算距离偏差值的时间过程图

Fig. 7 The process of calculating the distance deviation value based on the target's visual position

#### 4.4 空间碎片目标观测数据结果

经过改造,长春站 1 m 激光通信望远镜系统具备了空间碎片激光测距能力,并获得了空间碎片的有效观测数据。在获得的有效数据中,实现了最低仰角  $20^\circ$  的有效测距,观测数据延伸到晨昏时段(太阳高度角大于  $-5^\circ$ ),观测目标的最小 RCS 达到  $1.3 \text{ m}^2$ ,主要集中在  $5 \text{ m}^2$  左右;观测轨道距离从 400 km 到 1800 km,测距精度最高优于 1 m。表 2 为部分观测数据。

表2 部分观测数据列表

Tab.2 Partial observation data list

序号	观测弧段/min	目标代号	回波点数	精度 RMS/cm	距离/km/	RCS/m <sup>2</sup>
1	01 : 48	28059	1713	119.3	878 ~ 1112	6.2
2	03 : 13	11267	926	104.4	674 ~ 1082	4.4
3	01 : 09	39027	561	88.7	547 ~ 884	1.4
4	03 : 06	16409	311	84.2	1038 ~ 1316	5
5	01 : 05	25281	338	109.7	682 ~ 1031	1.4
6	01 : 27	6061	487	102.4	783 ~ 1041	4.7
7	01 : 05	2621	440	132.3	592 ~ 761	1.3
8	01 : 07	28059	851	130.4	926 ~ 1197	6.2
9	02 : 01	17291	831	86	965 ~ 1196	4.7
10	02 : 17	16615	1050	118.1	837 ~ 1398	7

## 5 总结与展望

激光通信和测距一体化,可以为卫星、飞机和地面站等平台实现激光通信和测距功能。许多航天大国均对激光通信和测距一体化技术给予了高度重视,并进行了大量实验。本文首先对激光通信和测距一体化国内外研究进展进行了介绍。然后,结合国内研究现状,提出了具有空间碎片激光测距能力的激光通信和测距一体化系统设计方案。最后,在长春站1米激光通信望远镜系统上进行了改造,增加了空间碎片激光测距功能,并获得了有效观测数据,观测数据精度最高优于1 m。激光测距通信一体化系统方案的实现,从理论和实践上证实了方案的可行性,且验证了高精度激光测距的数据处理技术;同时,该系统还增加了空间目标偏振成像探测器,能够对空间目标进行偏振成像。随着我国月球探测的逐步开展,研究地月超远距离测距和通信技术,对提升我国深空探测、测轨与定轨、数据传输的工程能力,解决载人登月、火星探测等深空探测通信难题有着重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Wilson K, Jeganathan M, Lesh J R, et al. Results from Phase-1 and Phase-2 GOLD experiments [R]. TDA Progress Report, 1997: 42 - 128.
- [2] Ke Xizheng, Zhang Tong. Research of diversity receiving in wireless laser communications [J]. Optoelectronics Letters, 2014, (4): 5.
- [3] Han Huipeng. Analysis of interplanetary links in low-orbit communication constellation [J]. Satellite & Network,

2018, (8): 40 - 42. (in Chinese)

韩慧鹏. 低轨通信星座星间链路浅析 [J]. 卫星与网络, 2018, (8): 40 - 42.

- [4] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. The technologies and systems of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- 姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [5] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 6(5): 670 - 680. (in Chinese)
- 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.
- [6] Toyoshima M, Leeb W R, Kunimori H, et al. Comparison of microwave and light wave communication systems in space applications [J]. Optical Engineering, 2007, 46(1): 015003.
- [7] Wu Congjun. Study of inter-satellites laser communication terminals and its laboratory testing platform's optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- 吴从均. 星间激光通信终端及其实验室检测平台光学系统研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院, 长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [8] Lv Botao, An Ning, Han Xingwei, et al. Research on SLR echo characteristics based on lidar atmospheric correction model [J/OL]. Acta Optica Sinica: 1 - 16 [2023 - 11 - 21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20231114.1243.032.html>. (in Chinese)
- 吕柏韬, 安宁, 韩兴伟等. 基于激光雷达大气修正模型



- 的 SLR 回波特性研究[J/OL]. 光学学报:1-16[2023-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20231114.1243.032.html>.
- [9] 刘基余. 卫星激光测距技术与方法[M]. 北京:测绘出版社,2018.
- [10] Deng Huarong, Long Mingliang, Zhang Haifeng, et al. Experiment of satellite laser ranging in daytime based on 1064 nm wavelength[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020,49(10):134-139. (in Chinese)  
邓华荣,龙明亮,张海峰等. 1064 nm 波长白天卫星激光测距试验[J]. 红外与激光工程,2020,49(10):134-139.
- [11] Zhang Zhi-ang. Research on detecting system of KHz SLR in daytime[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology,2012. (in Chinese)  
张子昂. 白天 KHz 卫星激光测距回波探测系统研究[D]. 长春:长春理工大学,2012.
- [12] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers,2018,11(6):901-913. (in Chinese)  
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.
- [13] Li Wei. Research on integration technique of laser ranging and communication[J]. Laser & Infrared,2013,43(12):1345-1347. (in Chinese)  
李玮. 激光通信/测距一体化技术研究[J]. 激光与红外,2013,43(12):1345-1347.
- [14] Min Tao, Jian Guan, Tao Peng, et al. Simultaneous realization of laser ranging and communication based on dual-pulse interval modulation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2021,70:1-10.
- [15] Yang Haifeng. Research on and implementation of integrated technique of laser ranging and data transmission based on digital coherent system[J]. Telecommunication Engineering,2023,63(8):1159-1164. (in Chinese)  
杨海峰. 基于数字相干体制的激光测距数传一体化技术研究是实现[J]. 电讯技术,2023,63(8):1159-1164.
- [16] Zheng Yao, Fan Cunbo, Dong Xue, et al. Calibration method for beam collimation of near-infrared space debris laser ranging[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(12):1815-1819. (in Chinese)  
郑瑶,范存波,董雪等. 近红外空间碎片激光测距光束准直性标校方法[J]. 激光与红外,2022,52(12):1815-1819.