

引用本文: 乔元哲, 李铁龙, 李海昊, 等. 高速星间激光通信终端设计与验证[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 17-21.

高速星间激光通信终端设计与验证

乔元哲¹, 李铁龙¹, 李海昊¹, 黄印¹, 于思源², 杨健^{1*}

(1. 北京遥感设备研究所, 北京 100039; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 星载空间激光通信终端具备设备体积小、通信速率高和保密性强等优势, 是未来大规模星座组网的首选方案。为进一步提升激光通信终端的通信速率和实用性, 采用非相干激光通信技术、无信标捕获技术、前置光放大与单模光纤耦合技术和 3D 打印导热一体化技术, 研制了基于摆镜架构的同轨、异轨 2 种型号激光通信终端, 并完成了动态捕获跟踪、高速通信试验和环境适应性试验。同轨、异轨 2 种型号产品重量分别为 12 kg 和 14 kg, 在 1 mrad 不确定区域内平均捕获时间为 12.4 s, 通信速率可达 10 Gb/s@4000 km, 经过前向纠错编码后误码率小于 10^{-7} 。

关键词: 卫星通信; 空间激光通信; 非相干高速通信; 无信标捕获; 摆镜式终端

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)04-0017-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and verification of high-speed inter-satellite laser communication terminal

QIAO Yuanzhe¹, LI Tielong¹, LI Haihao¹, HUANG Yin¹, YU Siyuan², YANG Jian^{1*}

(1. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100039, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The inter-satellite laser communication terminal has the advantages of small size, high communication rate and strong confidentiality, which is the first choice for large-scale constellation networking in the future. In order to further improve the communication rate and practicability of laser communication terminals, two types of laser communication terminals based on the swing mirror architecture are developed by using incoherent laser communication technology, beacon-free capture technology, prelight amplification and single-mode fiber coupling technology, and 3D printing thermal conductivity integration technology. Dynamic capture and tracking, high-speed communication test and environmental adaptability test are completed. The weight of the two models is 12 kg and 14 kg respectively, the average capture time is 12.4 s in 1 mrad uncertain region, the communication rate can reach 10 Gb/s@4000 km, and the bit error rate is less than 10^{-7} after forward error correction coding.

Key words: satellite communication, space laser communication, incoherent high-speed communication, beaconless acquisition, tip-tilt mirror

0 引言

空间激光通信是一种利用激光束作为载波在自由空间进行图像、语音和信号等数据信息传递的通信方式。与传统微波通信相比, 空间激光通信具有传输速率快、通信容量大、抗电磁干扰性能强、保密性高且

通信终端体积小、功耗低和实用性好等优点^[1-4], 美国已经明确把空间激光通信作为星间组网方式^[5-6]。

随着激光终端进一步向实用化发展, 无独立信标光捕获技术^[7](简称无信标捕获技术)和高速非相干通信技术已经成为研究重点。无信标捕获技术采用信号光直接捕获, 取消了传统的信标激光器和收发光路, 可有效降低系统复杂度。由于信号光波束宽度仅有几十 μrad , 在捕获过程中容易受到在轨动态环境影响, 捕获难度大, 目前国内尚无在轨成功应用的报道。非相干激光通信体制简单可靠、成本较低, 有利于激光通信终端的大规模商业化应用, 但是受限于其探测灵敏度, 通信速率有待进一步提升。

收稿日期: 2022-01-27。

作者简介: 乔元哲(1988—), 男, 山东泗水人, 博士, 高级工程师, 现为北京遥感设备研究所激光通信项目负责人, 从事星载激光通信终端总体设计。主要研究方向为激光通信瞄准捕获跟踪技术和在轨修正技术。

*** 通信作者:** 杨健(1976—), 男, 硕士, 研究员, 北京遥感设备研究所先进通信总体技术研究室主任, 主要研究方向为通信与组网。



乔元哲,李铁龙,李海昊,等;高速星间激光通信终端设计与验证

本文根据某项目星间激光通信终端高速率、低成本和轻小型化的要求,采用非相干激光通信技术研制同轨、异轨 2 种型号激光通信终端,并在等效试验中验证动态环境无信标捕获技术、10 Gb/s 非相干高速通信技术。

1 高速星间激光通信终端技术途径

1.1 非相干激光通信系统结构

传统的探测方案通过透镜将空间光束直接耦合到光电探测器(APD)的多模光纤输入端面中,接收机灵敏度取决于 APD 的灵敏度。对于 10 Gb/s 星间激光通信传输系统,当误码率低于 10^{-4} (无纠错编码)时,APD 探测灵敏度仅有 -28 dBm 左右,难以满足远距离高速通信需求。因此,本文采用非相干激光通信技术,在 APD 前端增加接收光放大器,系统结构框图如图 1 所示。空间光信号首先经光学接收天线及光路耦合到接收光放大器的单模光纤端面上,然后由接收光放大器放大后进入 APD,此时 10 Gb/s 接收机灵敏度可由 -28 dBm 提升到 -40 dBm 以上。

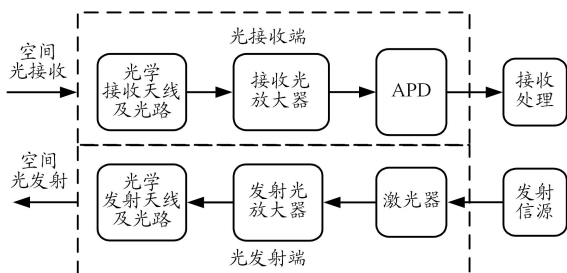


图 1 非相干激光通信系统结构框图

1.2 链路预算

在高速星间激光通信链路设计中,考虑的主要因素包括发射功率、收发天线增益、收发光路损耗、空间损耗和瞄准、捕获与跟踪(PAT)失配损耗等^[8]。由于接收光放大器采用单模光纤,光纤纤径($9\text{ }\mu\text{m}$)远小于多模光纤($62.5\text{ }\mu\text{m}$),这对系统的光束耦合精度提出了更高要求,因此需要额外考虑 4 dB 的光纤耦合损耗。高速星间激光通信链路功率预算如表 1 所示。此外,信号光束散角设计为 $35\text{ }\mu\text{rad}$,信号光捕获跟踪探测器选用波长为 1550 nm 的近红外探测器(灵敏度小于等于 -60 dBm)。

1.3 捕获方案

在传统的捕获跟踪方式中,一般采用大束散角的信标光进行扫描,由于扫描机构为粗瞄单元,因此单步执行时间较长、精度差。在无信标捕获跟踪方式中,扫描光束散角降低为信标光捕获跟踪系统扫描束散

表 1 高速星间激光通信链路功率预算表

系统参数名称	链路增益/衰减	备注
通信发射功率/dBm	34.8	采用 3 W 功率光放大器
发射增益/dB	104.2	发散角为 $35\text{ }\mu\text{rad}$
发射光路损耗/dB	-1.4	—
空间损耗/dB	-270.2	传输距离为 4000 km
PAT 失配损耗/dB	-2	—
接收增益/dB	104.2	接收天线口径为 80 mm
接收光路损耗/dB	-1.9	—
光纤耦合损耗/dB	-4	—
分光损耗/dB	-0.4	分光器的分光比为 1:9
接收功率/dBm	-36.7	—
接收系统灵敏度/dBm	-40	传输速率为 10 Gb/s
链路余量/dB	3.3	—

角的十分之一左右,若采用粗瞄单元扫描,则无法满足快速捕获的时间和精度需求;若采用精瞄单元扫描,则无法实现对机构不确定区域的覆盖。为解决以上问题,本文采用粗瞄、精瞄相结合的无信标捕获方案,操作具体过程如下:

①将较大的不确定区域划分为多个子区域,每个子区域的大小不超过精瞄单元扫描的最大范围。

②在扫描时,粗瞄单元将光束定位到各子区域的中心后,启动精瞄单元在子区域内开展快速扫描。

③当一个子区域的扫描完成后,粗瞄单元将光束中心移动到下一个子区域的中心,启动精瞄单元继续进行快速扫描。精瞄单元扫描过程中,粗瞄单元仅实现轨道运动补偿的功能。

为实现对不确定区域的高概率覆盖,粗瞄单元采用矩形螺旋扫描方式,精瞄单元采用螺旋扫描方式,如图 2 所示。

在实际扫描过程中,由于卫星平台微振动、轨道指向跟踪误差和卫星姿态漂移,导致动态捕获时精度降低,采用的优化措施有:增加扫描重叠量;根据卫星平台姿态实时信息,对扫描曲线进行反向补偿。

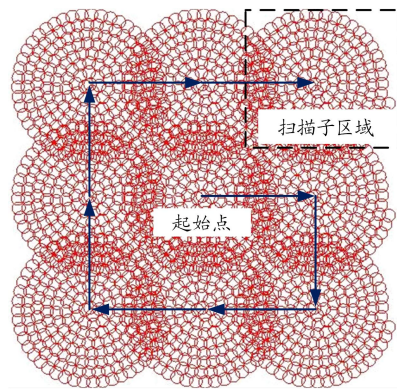


图 2 无信标粗瞄、精瞄复合快速捕获策略示意图

2 系统设计

高速星间激光通信终端包括同轨、异轨 2 种型号。每种型号均分为卫星舱外的光学与机电设备和卫星舱内的驱动控制与通信设备两部分。光学与机电设备包括光学单元、粗瞄单元和精瞄单元,主要实现空间光和光纤光的转换、位置信息探测和粗瞄和精瞄指向执行等功能。驱动控制与通信设备包含主控与通信单元、光放大单元和二次电源单元,主要实现主流程和 PAT 控制、通信处理、信号光收发放大、电源转换和热控控制等功能。高速星间激光通信终端系统原理图如图 3 所示,舱内和舱外通过控制线缆和光纤连接。

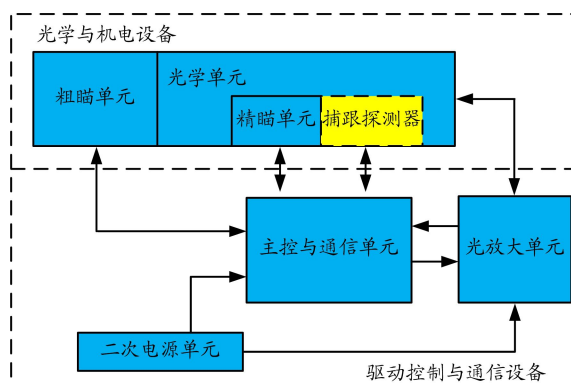


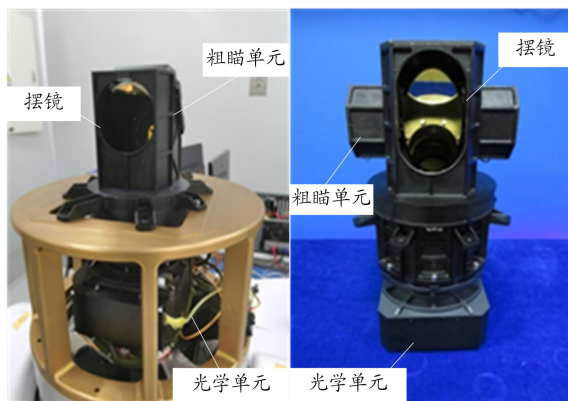
图3 高速星间激光通信终端系统原理图

2.1 光学与机电设备

高速星间激光通信终端光学与机电设备实物图如图 4 所示。光学单元和粗瞄单元结构采用一体化设计,外部光束通过摆镜反射到光学主镜中,精瞄单元位于光学单元内部。

2.1.1 光学单元

光学单元由光学天线和光学基板两部分组成,两者之间通过空间光束传递方式共同工作,其原理图如图 5 所示。其中,光学单元天线口径为 80 mm,采用卡



(a) 同轨终端

(b) 异轨终端

图4 高速星间激光通信终端光学与机电设备实物图

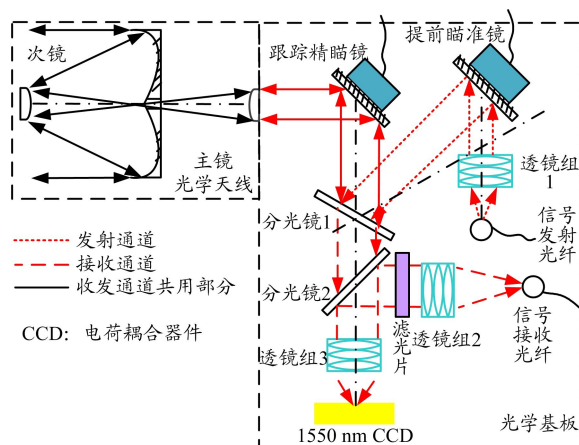


图5 光学单元原理图

氏同轴天线,实现发射光束的扩束和接收光束的缩束。光学基板部分包括信号发射通道、信号接收通道和信号位置探测器接收通道。其内部通过分光镜、滤光片等实现通信、探测光路复用功能,光路收发隔离度大于 100 dB。信号位置探测器内置现场可编程门阵列(FPGA)芯片,直接输出探测光斑位置信号,通过主控与通信单元和粗、精瞄单元构成控制闭环。

2.1.2 精瞄单元

精瞄单元采用压电陶瓷机构驱动反射镜,实现卫星之间空间光束收发的精确瞄准和跟踪控制,反射镜通过主控与通信单元进行供电和位置驱动。同轨终端包含一面跟踪快反镜,异轨终端包含一面跟踪快反镜和一面提前瞄准镜。提前瞄准镜用于补偿异轨卫星相对运动。跟踪快反镜在无信标扫描阶段实现对不确定子区域的快速覆盖;在跟踪阶段,则实现对卫星平台振动的抑制和轨道跟踪残差的精确补偿功能。

2.1.3 粗瞄单元

为降低整机重量和功耗,同轨和异轨终端粗瞄单元采用不同的驱动机构。同轨终端粗瞄单元采用音圈电机进行驱动,光束指向范围大于 $\pm 2^\circ$,位置偏转信息由电涡流传感器检测,具备较高的控制精度;异轨终端采用大角度步进电机驱动,光束方位轴指向范围为 $\pm 120^\circ$,俯仰方向为 $-5^\circ \sim 30^\circ$,其检测机构为高精度光电码盘,在不同位置分别测量其静态指向精度和动态跟踪精度,测试值均小于 $40 \mu\text{rad}$ 。

为进一步降低整体重量,粗瞄单元转台结构采用了北京遥感设备研究所成熟且擅长的结构拓扑优化技术和 3D 打印技术进行设计制造,并采用结构导热一体化设计,进一步降低产品重量和优化热特性。

2.2 驱动控制与通信设备

高速星间激光通信终端驱动控制与通信设备中,

乔元哲,李铁龙,李海昊,等:高速星间激光通信终端设计与验证

主控与通信单元包含数字信号处理(DSP)、FPGA、一体化光收发模块和粗瞄、精瞄驱动电路等,实现主流程控制、PAT控制、通信光收发转换、编解码处理和热控控制等功能,具备三模冗余、刷新和轨道重构的作用;光放大单元采用一体化光放大模块,分别由泵浦源、工作物质(掺铒以及铒镱共掺光纤光路)和控制单元构成,掺铒光纤实现小信号高增益放大,铒镱共掺光纤实现发射信号高功率放大。二次电源单元包含直流/直流(DC/DC)模块、电磁干扰(EMI)滤波电路等,实现卫星平台一次供电到激光终端各单元二次供电的转换功能。本文通过对接收光放大单元、主控与通信单元以及光收发模块关键参数的联合调测,实现了较高的非相干接收灵敏度,即通信速率为10 Gb/s,误码率小于 10^{-7} 时,通信灵敏度小于-40 dBm,接收信号信噪比大于15 dB。

3 地面测试

3.1 测试系统组成

本文搭建了高速星间激光通信终端实验室的地面模拟验证系统对激光通信终端进行测试。整套系统按功能划分,由等效空间光路模拟分系统、卫星平台运动模拟分系统和卫星通信与控制模拟分系统共3个分系统组成,如图6所示。测试现场如图7所示。

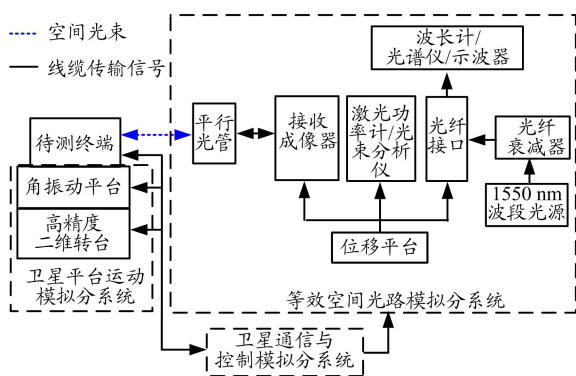


图6 高速星间激光通信载荷地面模拟验证系统原理图

等效空间光路模拟分系统用于模拟载荷在空间的信号光收发特性,配合其它系统进行光收发特性测试,主要由平行光管、位移平台、接收成像器、激光功率计/光束分析仪、波长计/光谱仪/示波器、光纤衰减器和1550 nm波段光源等组成。卫星平台运动模拟分系统实现激光链路所在卫星平台间低速、高精度运动的模拟,包含高精度二维转台和角振动平台两部分。卫星控制与通信模拟分系统通过输出卫星轨道位置、姿态及振动信息实现对高精度二维转台及角振动平台

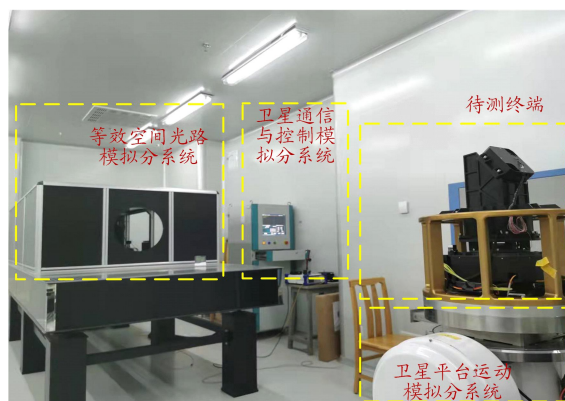


图7 高速星间激光通信载荷地面测试现场

的控制,根据选定的测试项目和参数对等效空间光路模拟分系统进行控制,同时为待测终端供电,模拟卫星平台的指令收发。

3.2 捕获跟踪测试

在捕获、跟踪测试过程中,本文采用二维转台和角振动平台加扰模拟在轨卫星相对运动和卫星平台微振动。

对于无信标捕获模式,采用粗瞄、精瞄单元进行分区复合螺旋扫描。对于1 mrad、1.5 mrad、2 mrad和2.4 mrad的不确定区域,均在不同拉偏角度下进行了100次动态捕获试验,平均捕获时间分别为12.4 s、25.6 s、47.5 s和64.2 s,捕获概率均大于94%,动态跟踪精度均大于4 μ rad(3 σ 准则)。

3.3 通信测试

发射信号时,高速星间激光通信终端首先接收卫星路由器网络数据,然后根据具体业务解出不定长的媒体访问控制(MAC)包,再进行定长帧组帧及链路层编码(适合光传输使用的8B/10B编码)。接收信号时,高速星间激光通信终端则先进行8B/10B解码,然后进行前向纠错编码(FEC)纠错处理。高速星间激光通信终端光路的传输速率为10 Gb/s,接收信号经过接收光放大后的眼图清晰,在接收光放大光纤输入端,不同接收功率下的误码率曲线如图8所示。可以看出,

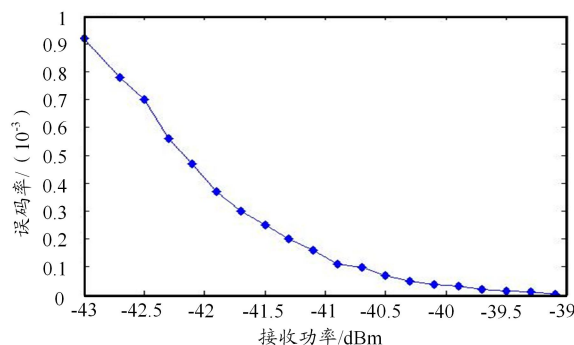


图8 不同接收功率下的误码率曲线

信号进行 FEC 后,当接收光放大器前端信号功率分别为 -40.5 dBm 、 -43 dBm 时,误码率分别小于 10^{-4} 、 10^{-3} 。

4 结束语

本文从技术途径、系统设计和地面等效测试 3 个方面,对北京遥感设备研究所研制的高速星间激光通信终端进行了介绍。终端分为同轨、异轨 2 种型号,单机重量分别为 12 kg 和 14 kg ,光学口径为 80 mm ,通信速率可达 $10\text{ Gb/s}@4000\text{ km}$,适用于低轨互联网星座组网。系统采用粗瞄、精瞄单元相结合的无信标捕获方案,在动态条件下, 1 mrad 不确定区域的平均捕获时间为 12.4 s ,跟踪精度大于 $4\text{ }\mu\text{rad}$ (3σ 准则)。当前,产品已通过了力学、热真空、电磁兼容试验,相关技术可为互联网星座建设提供有效支撑。

致谢:在本项目的研制过程中,南开大学电光学院刘波教授、刘海锋高级工程师和姚远博士给予了团队大量帮助。在与他们交流的过程中,作者得到了很多有益的启发,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] ENDO H, FUJIWARA M, KITAMURA M, et al. Free-space optical channel estimation for physical layer security [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8940–8955.
- [2] HEENA A, RAKESH G. A review on inter-satellite link in inter-satellite optical wireless communication [J]. Journal of Optical Communications, 2017, 38(1): 63–67.
- [3] 高世杰,吴佳彬,刘永凯,等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1171–1181.
- [4] WILSON K E, KOVALIK J, BISWAS A, et al. Development of laser beam transmission strategies for future ground-to-space optical communications[C]//SPIE. Proceedings of Defense and Security Symposium. Orlando: SPIE, 2007: 61892I-1–61892I-11.
- [5] 王燕,陈培永,宋义伟,等. 国外空间激光通信技术的发展现状与趋势[J]. 飞控与探测, 2019, 2(1): 8–15.
- [6] 王天枢,林鹏,董芳,等. 空间激光通信发展技术及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92–99.
- [7] TENG Y J, ZHANG M, TONG S F. The optimization design of sub-region scanning and vibration analysis for beaconless spatial acquisition in the inter-satellite laser communication system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 7909611-1–7909611-2.
- [8] 于思源. 卫星光通信瞄准捕获跟踪技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.