

引用本文:何晓垒,王振,钱阳,等.多自由度耦合振动环境下的近距激光通信系统设计与验证[J].光通信技术,2025,49(4):68-71.

多自由度耦合振动环境下的近距激光通信系统设计与验证

何晓垒¹,王振¹,钱阳¹,苏瑞芝¹,邱成²

(1.中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林541004;2.广西计量检测研究院,南宁530022)

摘要:针对商业航天器舱段间在极端震动环境下的高可靠性通信需求,提出一种抗多自由度耦合振动的近距激光通信系统。通过采用复合光路补偿结构、大发散角光学系统和基于深度学习的自适应控制算法,有效解决了多自由度振动导致的光学元件形变和光路失稳等技术难题。实验结果表明:在旋转20°、200 mm通信距离和10 mm偏移的极端工况,系统仍能保持稳定通信性能,接收功率波动小于2 dBm;在200 mm通信距离且同时存在10 mm偏移和20°旋转的最恶劣条件下,接收功率稳定在-10.84 dBm以上。

关键词:多自由度;耦合震动;近距;激光通信;光学稳定性

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0068-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and verification of short-range laser communication system under multi-degree-of-freedom coupled vibration environment

HE Xiaolei¹, WANG Zhen¹, QIAN Yang¹, SU Ruizhi¹, QIU Cheng²

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Guangxi Institute of Metrology & Measurement, Nanning 530022, China)

Abstract: To address the high-reliability communication requirements between commercial spacecraft modules under extreme vibration conditions, this paper proposes a close-range laser communication system resistant to multi-degree-of-freedom coupled vibrations. By employing a composite optical path compensation structure, a large divergence angle optical system, and a deep learning-based adaptive control algorithm, the system effectively resolves technical challenges such as optical component deformation and optical path instability caused by multi-degree-of-freedom vibrations. The experimental results indicate that, even under extreme operating conditions involving a 20° rotation, a communication distance of 200 mm, and a 10 mm offset, the system maintains stable communication performance with a received power fluctuation of less than 2 dBm. Furthermore, under the most severe conditions, where both a 10 mm offset and a 20° rotation coexist at a communication distance of 200 mm, the received power remains stable above -10.84 dBm.

Key words: multi-degree-of-freedom, coupled vibration, close-range, laser communication, optical stability

0 引言

随着商业航天的快速发展,在多级火箭分离、飞船对接与脱离等关键任务中,对高可靠性近距离通信的需求日益迫切。传统脱插连接器存在解锁可靠性

低、非正常脱落等风险^[1-3],难以满足无人化、高效率的应用需求。此外,这些工作环境常伴随高频震动等极端条件^[4],进一步增加了通信系统的设计难度。虽然激光通信技术凭借高传输速率和高安全性优势^[5-6]成为理想解决方案,但在震动环境下,激光波束易发生偏移,可能导致通信中断^[7]。针对这一问题,本文提出一种多自由度耦合振动环境下的近距激光通信系统。

1 系统设计与工作原理

本文提出的多自由度耦合振动环境下的近距激光通信系统的核心创新在于对无线激光通信模块的

收稿日期:2025-03-18。

基金项目:国家自然科学基金项目(U2441250)资助。

作者简介:何晓垒(1983—),男,河南漯河人,中国电子科技集团公司专家,主要从事无线激光通信方面工作。曾获中国电子科技集团公司科学技术奖三等奖;主笔的光通信专业技术方案获中国电子科技集团公司科学技术奖(专利)优秀奖。



优化设计。系统组成图如图1所示。该系统采用发射端和接收端的双模块架构:发射端通过无线激光信号发射电路将业务数据调制到光信号上,经大气(或其它介质)传输后,由接收端的探测电路完成光信号接收与数据转换^[8]。

图1中,光学天线模块包含发射光路(含扩束系统)和接收光路(含聚焦透镜),共同完成信号光的发射与接收功能。其设计要点是提高发射和接收效率。发射光路中的扩束系统首先完成光束整形与发散角控制,接收端信号跟踪光路依次执行粗对准(通过扩束/缩束系统)和精对准(控制收发光轴指向)操作,确保激光链路可靠建立。系统设计在保证光束覆盖范围的同时维持了足够的能量密度以满足通信质量要求^[9],并且接收端的光学天线模块将入射光束高效聚焦耦合至光电探测器并转换为电信号输出^[10-11]。但在多自由度耦合振动环境下,光学天线中的激光波束易发生偏移,可能导致通信中断,影响产品在振动环境下的可靠性、鲁棒性。针对此问题,本文对光学天线中的扩束系统进行优化,使其在满足高速通信需求的情况下,兼顾其抗振动特性,提升产品在复杂振动环境下的可靠性。

与常规设计相比,该设计采用直径 Φ 为25 mm的非球面透镜作为聚焦镜,增大接收增益,同时满足大的视场接收要求,使其在满足高速通信需求的情况下,兼顾其抗振动特性,同时满足偏移、偏转状态下信号光耦合入探测器光敏面的要求。

由于两端收发模块之间的安装距离较近且光传输距离短,同时存在高频的多自由度耦合振动,因此需要对发射光进行扩束处理,以增加信号光的覆盖面积。这样即使组件在Y轴和Z轴上产生一定的位移,也能保证所需的信号接收功率得到满足。接收透镜采用直径 Φ 为25 mm的非球面透镜,可以有效应对各种偏移和偏转情况,确保信号光能够准确无误地耦合到探测器的光敏面上。光路传输示意图如图2所示。

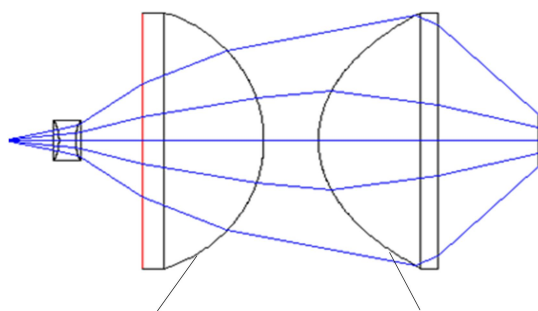


图2 光路传输示意图

2 光学系统传真与优化

2.1 光路参数设计

发射光路采用波长为905 nm的激光器作为信号光源,其垂直发散角典型值为 35° ,水平发散角典型值为 10° 。为满足5 mm通信时容许错位 ± 10 mm通信(出光口位置光束直径要大),200 mm通信时容许偏转角度 $\pm 2^\circ$ 偏转通信(光束发散角要稍大一点),需采用1~2片柱面透镜、负透镜进行整形(可利用的扩束距离约为10~15 mm)。为满足在发射窗口出现直径4 mm遮挡物时,在近距离通信时仍有部分口径边缘光束聚焦到探测器,需采用一片正透镜压缩发散角。

发射光路仿真示意图如图3所示。本文采用1片负透镜、1片平凹柱透镜进行扩束、1片双凸透镜进行

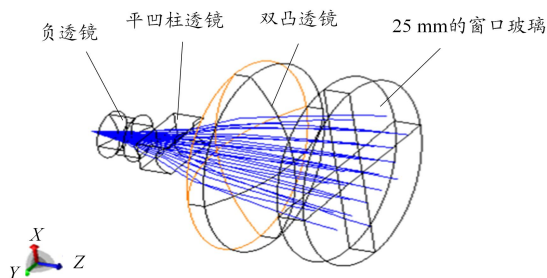


图3 发射光路仿真示意图

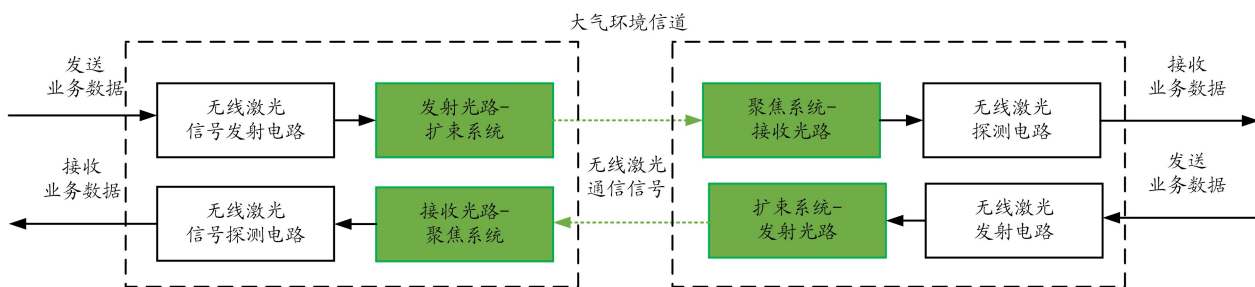


图1 系统组成图

何晓垒,王振,钱阳,等:多自由度耦合振动环境下的近距激光通信系统设计与验证

发散角压缩,在最外面设置1片直径为25 mm的窗口玻璃;系统总物理厚度约为30 mm(从激光器芯片到窗口外表面距离);垂直和水平方向的半发散角分别为0.281 rad(16.1°)和0.126 rad(7°),在窗口处垂直方向光束半径为7.534 mm、水平方向为9.548 mm。

接收光路仿真示意图如图4所示。本文采用1片平凸非球面透镜聚焦到光敏面直径2 mm的雪崩光电二极管(APD)探测器上,在透镜前放置滤光片、窗口玻璃,理论的最大接收视场角为 $\pm 3^\circ$ 。中心视场(表征光学系统的基准分辨率)和边缘视场(反映系统在全视场范围内的均匀性)的聚焦弥散斑如图5所示,其半径的均方根为41.38,呈对称的圆形,满足光路要求。

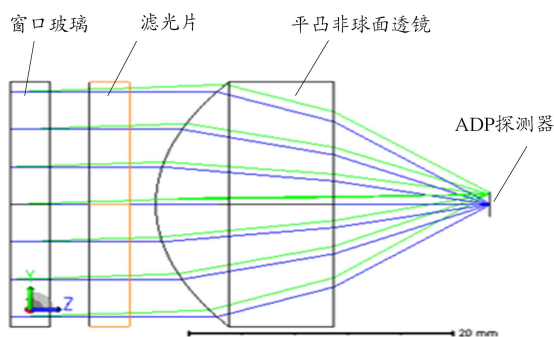


图4 接收光路仿真示意图

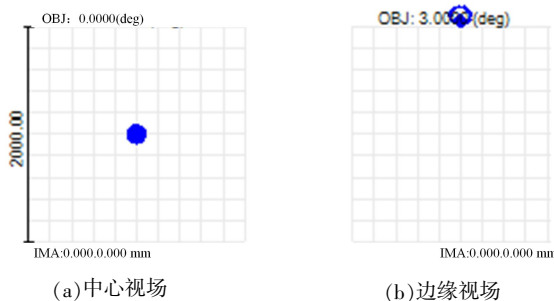


图5 中心视场和边缘视场的聚焦弥散斑

2.2 性能仿真验证

基于光路参数设计,本节通过仿真验证系统在多自由度振动下的性能。

2.2.1 一维简谐振动时功率余量计算及仿真

在振动过程中,发射端与接收端不仅会产生垂直方向的相对位移,还会存在一定角度范围内的相对偏

转运动。为简化运算,仿真过程分解为一维方向仿真和耦合方向仿真2个独立步骤。

本文采用25 mm直径接收透镜(APD接收灵敏度为-25 dBm)实现5~200 mm动态通信,其仿真功率余量如表1所示。可以看出,在最大通信距离为200 mm时的功率余量仅较最小通信距离为5 mm时衰减2 dB。该设计在一维简谐振动环境下仍能保持稳定通信,完全满足系统设计要求。

2.2.2 耦合振动时功率余量计算及仿真

设备运行过程中可能产生位置偏移、角度旋转或其复合运动(位置偏移+角度旋转),仿真结果如表2所示。在光学设计中,只要这3种情况引起的功率波动不超过3 dB即可满足通信需求。

表2 不同情况下在耦合振动时的功率余量计算及仿真结果

通信距离/ mm	3种情况的功率值/dBm		
	位置偏移 10 mm	角度旋转 2°	位置偏移 10 mm+ 角度旋转 2°
5	-7.2	-6.8	-8.15
10	-7.25	-6.85	-8.35
40	-7.93	-6.98	-10.11
200	-10.24	-9.52	-14.44

3 实验验证与性能分析

本实验通过对收发模块进行平移和旋转操作,验证光学系统在极限位置下的通信性能。

3.1 多自由度耦合振动实验

本文将收发端设备搭载于舱内以代替接口插头,并且采用固定安装方式进行安装。然而,在任务进行中,由于存在多自由度的耦合振动,可能导致以下情况:接收端与发射端因振动导致距离增大、双方角度发生偏转,或两者相对位置产生偏置,甚至上述多种情况同时发生。故本次将多自由度耦合振动划分为3种典型工况:X轴向收发终端间距增大、Y轴向收发终端间距增大以及收发终端相对偏转运动。

3.2 实验结果

在常温下,将接收与发射端设备摆放于振动发生

表1 一维简谐振动时功率余量仿真计算

通信距离/mm	光源功率/dBm	几何损耗/dB	滤光片损耗/dB	透过损耗/dB	接收功率/dBm	灵敏度/dBm	功率余量/dB
200	10	-12.74	-3	-2.67	-8.41	-20	-11.59
5	10	-10.83	-3	-2.67	-6.41	-20	-13.59

时的极限位置,测试不同位置下接收端的功率情况,如图6所示。可以看出,通信距离从0~200 mm逐渐增大,通信功率从峰值5.3 dBm下降至-8.88 dBm,而在相同通信距离时,将角度从0°旋转至最大值20°通信功率最大降低2 dBm,说明通信距离的增加是导致功率下降的主要因素,而相同距离下的角度偏转对功率的影响相对较小,这得益于较大的束散角设计。系统对角度偏移和垂直位移同时发生时,在相同距离下,其平均通信功率仅下降2.6 dBm,最恶劣的情况下仍然有-10.84 dBm,表现出良好的容差能力。然而,随着通信距离的增加,大气衰减效应导致接收功率呈规律性下降。但即使在最大通信距离和极限偏移位置的复合工况下,系统仍能维持足够的通信功率并实现无误码传输,这验证了设计方案的可靠性。

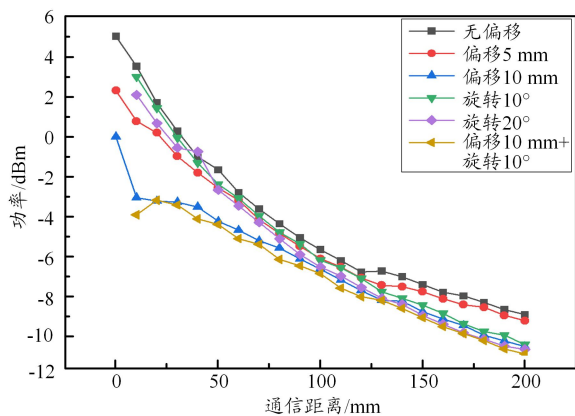


图6 不同位置下接收端的功率情况

4 结束语

本文针对商业航天器舱段间多自由度耦合振动环境下的通信需求,提出了一种高可靠性的近距激光通信系统设计方案。实验结果表明:系统在0~200 mm通信距离范围内,接收功率从5.3 dBm降至-8.88 dBm;在20°角度旋转时功率仅下降2 dBm;在距离200 mm且同时发生10 mm偏移和20°旋转的最恶劣工况下,仍能维持-10.84 dBm的接收功率。该研究为航天器动态

环境下的无线通信提供了有效的技术解决方案,对提升极端工况下的通信可靠性具有重要应用价值。

参考文献:

- [1] ZHANG W, LIU Y, WEI Y. Research on D subminiature connector plugging method on spacecraft[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, 452(4): 452-456.
- [2] LI X, KONG Z, BAI J, et al. Analysis of optical fiber connector contact damage caused by fluctuations in ambient temperatures of spacecraft[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 71: 102899-102905.
- [3] LI G, WANG S, WEN J, et al. Solder joint shape optimization and thermal-mechanical reliability improvement for microwave RF coaxial connectors[J]. Microelectronics and reliability, 2024, 154(3): 1-1-1-10.
- [4] LEE J R, CHIA C C, KONG C W. Review of pyroshock wave measurement and simulation for space systems[J]. Measurement, 2012, 45(4): 631-642.
- [5] KE X, WU J, YANG S. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. Chinese Journal of Radio Science 2021, 36: 323-339.
- [6] GRIETHE W, GREGORY M, HEINE F, et al. High-speed laser communications in UAV scenarios[C]//SPIE. Proceedings of the Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications VIII. Orlando: SPIE, 2011: 106-115.
- [7] ZHANG M, LI B, TONG S. A new composite spiral scanning approach for beaconless spatial acquisition and experimental investigation of robust tracking control for laser communication system with disturbance[J]. IEEE Photonics Journal 2020, 12: 1-12.
- [8] GAO L, LIU Q, HE Z. Two-dimensional optical phased array reflector based on gires-tournois resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41: 132-137.
- [9] 裴晓磊, 曾亮, 何晓垒. 一种近场无线激光携能通信系统的研究与设计[J]. 广东通信技术, 2022, 42(10): 64-68.
- [10] ANTONELLO R, BRANZ F, SANSONE F, et al. High-precision dual-stage pointing mechanism for miniature satellite laser communication terminals[J]. IEEE, 2021, 68(1): 776-785.
- [11] LONG X, YANG L, FANG Y, et al. Laser charging for UAV-based FSO-RF communication systems[C]//IEEE. Proceedings of the 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Changsha: IEEE, 2021: 1-6.
- [12] ROBERTS L C, MEEKER S R, TESCH J, et al. Performance of the adaptive optics system for laser communications relay demonstration's ground station[J]. Applied Optics, 2023, 62(23): G26-G36.