

引用本文:李宽,王振,唐鑫科,等. 基于偏振光路的星载相干激光通信热控设计与验证[J]. 光通信技术,2025,49(4):82-86.

基于偏振光路的星载相干激光通信热控设计与验证

李宽,王振,唐鑫科,何晓垒,李博,吴愉华,苏瑞芝

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004)

摘要: 为了保障基于偏振光路的星载相干激光通信系统在极端空间热环境下的稳定运行,提出了一种基于偏振光路的星载相干激光通信热控设计方案。该方案采用被动与主动热控技术相结合的方式,通过 NX/TMG 软件仿真分析了典型轨道工况下的外热流分布,确定了多层隔热材料包覆和散热面优化的被动热控策略,并设计了分区温控的主动加热系统,采用比例-积分-微分(PID)算法实现 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温精度。热平衡试验结果表明,优化后的系统在 $22\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下,偏振圆度稳定大于等于95%,束散角控制在 $65\pm 5\text{ }\mu\text{rad}$,显著提升了光学系统的热稳定性和通信可靠性。

关键词: 星载相干激光通信;偏振光路;分级温控;偏振圆度;束散角

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)04-0082-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Thermal control design and verification for spaceborne coherent laser communication based on polarization optical path

LI Kuan, WANG Zhen, TANG Xinke, HE Xiaolei, LI Bo, WU Yuhua, SU Ruizhi

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To ensure the stable operation of spaceborne coherent laser communication systems based on polarization optical path under extreme space thermal environments, a thermal control design scheme is proposed. This scheme combines passive and active thermal control technologies. The external heat flux distribution under typical orbital conditions is analyzed through NX/TMG software simulation, leading to the determination of a passive thermal control strategy involving multilayer insulation material wrapping and heat dissipation surface optimization. Additionally, a zoned temperature control active heating system is designed, utilizing a proportional-integral-derivative (PID) algorithm to achieve a temperature control accuracy of $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Thermal balance test results show that the optimized system maintains polarization purity stably above 95%, with beam divergence angle controlled within $65\pm 5\text{ }\mu\text{rad}$ under $22\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ conditions, significantly enhancing the thermal stability of the optical system and communication reliability.

Key words: spaceborne coherent laser communication, polarization optical path, hierarchical temperature control, polarization ellipticity, beam divergence angle

0 引言

随着航天技术的快速发展,星载相干激光通信技术凭借其通信容量大、抗干扰能力强、保密性好等优势,成为未来空间通信的重要发展方向^[1-2]。作为星间激光通信系统的核心组成部分,星载相干激光通信系统单机的性能直接影响整个系统的通信质量。然而,在轨运行期间,单机面临复杂的热环境挑战,包括高低温交变、热变形等问题,这些因素可能导致元器件性能退化甚至单机失效^[3-4]。因此,设计高效可靠的热控系统对保障单机在轨稳定运行至关重要。

收稿日期:2025-05-20。

基金项目:国家自然科学基金项目(U2441250)资助。

作者简介:李宽(1991—),男,广西玉林人,硕士。主要从事无线激光通信技术、航天产品技术研究工作,具体研究方向包括:精密光机系统设计装调、激光通信载荷热仿真分析等。作为核心成员参与国家重大工程及省部级项目5项,获省部级科技奖励2项(二等奖1项、三等奖1项)。



目前,国内外学者针对星载相干激光通信单机热控技术开展了广泛研究。在被动热控方面,国外学者采用热控白漆^[5-7]和多层隔热材料(MLI)^[8]降低功耗并提升了光学系统的保温性能;主动热控研究则聚焦于

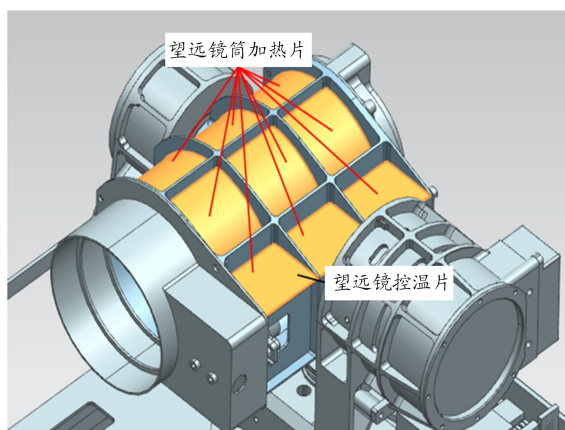
李宽,王振,唐鑫科,等: 基于偏振光路的星载相干激光通信热控设计与验证

漆,该涂层材料经过特殊配方设计,具备优异的空间环境耐受性;其次,在设备内部布局时,将互补金属氧化物半导体(CMOS)、电荷耦合器件(CCD)等高热耗器件集中布置于靠近散热面的区域;最后,通过高导热铜带构建高效热传导路径,确保器件产生的热量能够快速传导至散热面。该设计方案实现了发热器件工作温度的精确控制。

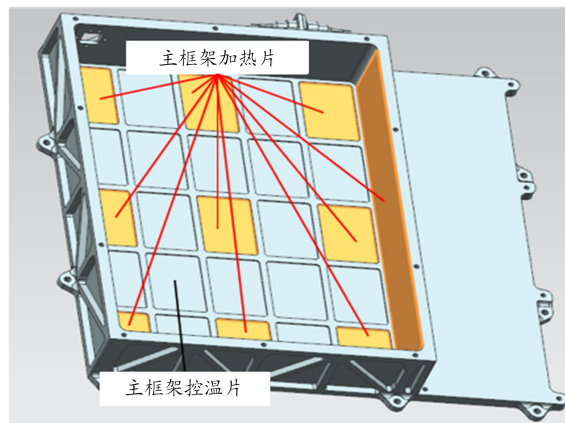
1.3 主动热控措施

主动热控系统通过外部能源消耗实现精确温度调控,确保激光通信光机在极端温度环境下的稳定工作。本方案针对低温工况设计了基于加热片的主动热控系统,具体实施如下:

关键部位加热片布置:在望远镜筒、主镜筒及后光路基板等关键部位布置柔性薄膜加热片。该加热片采用聚酰亚胺基底,厚度为 0.2 mm,具有高可靠性,热响应时间小于 30 s。加热片在整机上位置布局示意图如图 2 所示,其功率密度可达 1.5 W/cm^2 ,通过精密蚀刻电路确保发热均匀性。



(a) 望远镜加热片



(b) 后光路基板加热片

图 2 加热片在整机上的位置布局示意图

分区温度控制策略:将载荷划分为 11 个独立温控区域,每个区域配置 2~3 个 MF501 热敏电阻温度传感器。采用比例-积分-微分(PID)闭环控制算法,实现 $\pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温精度。特别对光学系统实施梯度温控,确保各光学元件间的热变形匹配。

智能功率调节:根据轨道周期和工况变化自动调节加热功率,即在阴影区启动全功率加热(最大 28 W),日照期切换至维持功率。系统配备主备双路供电,确保单点故障不影响正常运行。

热耦合优化设计:在加热区域外围设置多层包覆,有效减少面向宇宙背景的热泄漏,显著提升能源利用效率。

经地面测试验证,该系统在 $-5 \sim +35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极限温度范围内可维持光学系统 $23 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作温度,完全满足激光通信载荷对热稳定性的严格要求。与传统热电制冷器(TEC)方案相比,本方案具有可靠性更高、能耗降低约 40%,且无运动部件等优势。

将计算所得的外热流数据导入热分析模型,并将主、被动热控实施后的参数代入到仿真模型中,其设备关键光学部分的温度响应结果如表 2 所示。可以看出,铝基碳化硅光学平台(舱外)的最高温度为 $29.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度为 $10.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,满足关键光学器件在太空极端环境下的工作温度要求。

表 2 激光通信设备载荷在轨仿真

序号	器件	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	最低温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	偏振镜座	28.5	26.5
2	铝基碳化硅光学平台(舱外)	29.7	10.5

2 热平衡试验

在激光通信光机热平衡试验中,本文采用真空罐模拟空间环境(包括真空条件和低温黑背景),并利用红外加热笼施加外部热流。试验设置如下:

1)环境条件:真空罐热沉温度小于 100 K(测试中维持在 95 K),模拟空间背景环境;真空度优于 $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ (测试中控制在 $6.5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$),模拟在轨真空环境。

2)热流控制:根据 3 种不同工况的特点实施分区控制,严格按工况定义加载热流;通过调节外部热流(忽略热流波动引起的波衍效应)、工作模式、内部热源分布及热控层热物性参数,实现真实轨道工况模拟。

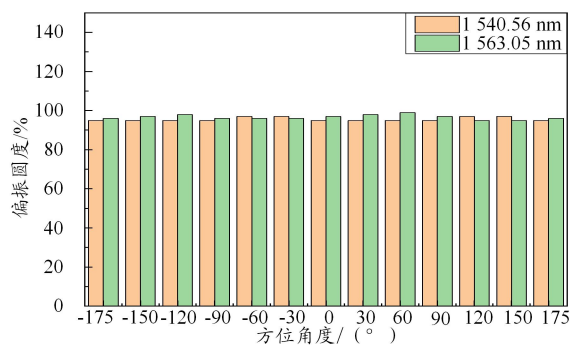
热平衡测试按照从低温到高温的顺序完成,具体参数设置如表 3 所示。

表3 热平衡试验测试条件

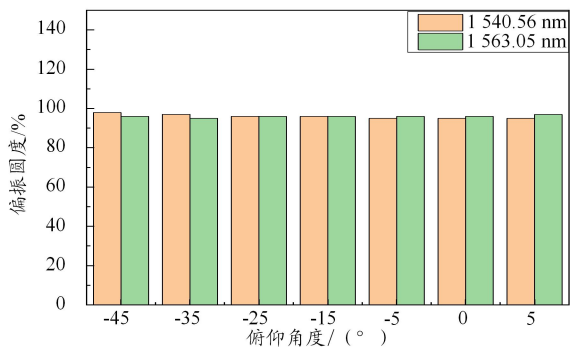
序号	工况名称	主要设定条件
1	低温	夏季,太阳常数为 $1\,322\text{ W/m}^2$;多层隔热材料(MLI)性能参数太阳吸收比/红外发射率 $\alpha/\varepsilon=0.36/0.69$,白漆(KS-ZT)性能参数 $\alpha/\varepsilon=0.17/0.87$;主动热控持续运行,平台设备长期工作,有效载荷关闭
2	高温	冬季,太阳常数为 $1\,414\text{ W/m}^2$;多层隔热材料(MLI)性能参数 $\alpha/\varepsilon=0.36/0.69$,白漆(KS-ZT)性能参数 $\alpha/\varepsilon=0.17/0.87$;主动热控持续运行,平台设备长期工作,有效载荷开启
3	瞬态	多层隔热材料(MLI)性能参数 $\alpha/\varepsilon=0.36/0.69$,白漆(KS-ZT)性能参数 $\alpha/\varepsilon=0.17/0.87$;主动热控持续运行,平台设备长期工作,有效载荷开启;在轨道周期内外热流随时间变化

2.1 偏振圆度及束散角结果

经过优化热控设计后,偏振光路系统在轨试验模拟中表现出较高的性能稳定性。热平衡试验时的偏振圆度、束散角分别如图3、图4所示。从图3可以看出,在 $22\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度工况下,系统的偏振圆度稳定大于等于 95% ;从图4可以看出,束散角控制在 $65\pm 5\text{ }\mu\text{rad}$ 。这一改进主要归因于3项关键技术创新:首先,采用高精度温控策略,将光学平台温度波动控制在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,使得反射镜面型精度保持在 $\lambda/10$ (λ 为工作波长);其次,使用铝基碳化硅作为光学平台底座,并加入加强筋等结构,通过材料与结构的双重保障降低了光机耦合变形;最后,试验验证显示,在模拟轨道热循环条件下,束散角变化率小于 5% ,完全满足星间激光通信对偏振保真度和远场能量分布的核心要求。



(a) 不同方位角度

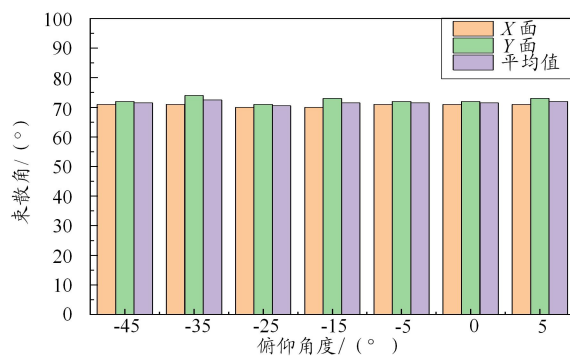
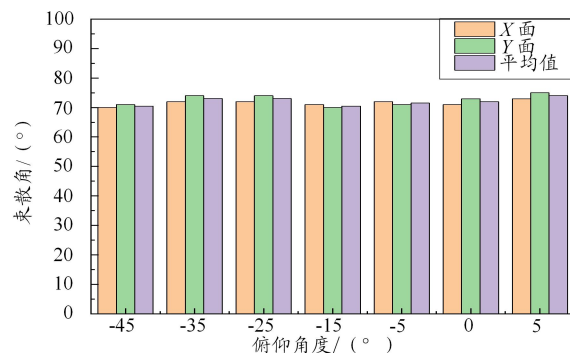
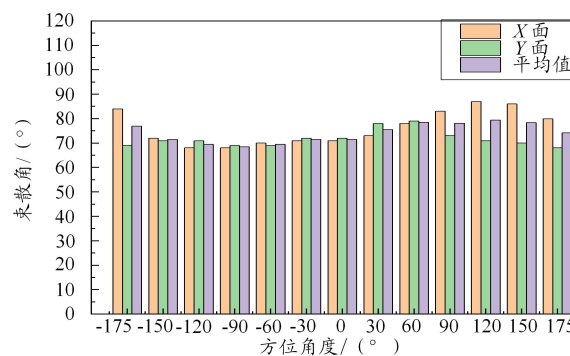


(b) 不同俯仰角度

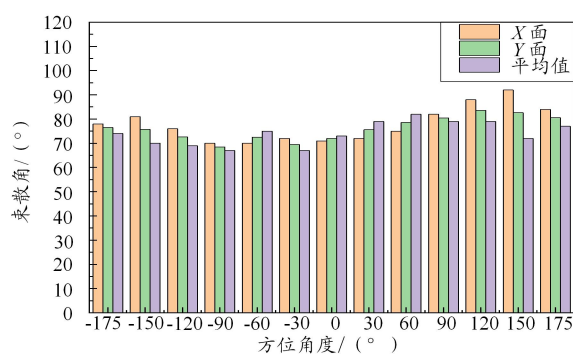
图3 热平衡试验时的偏振圆度

2.2 关键部件温度

不同工况下卫星关键部件的温度变化曲线如图5所示。可以看出,通过采用铝基碳化硅光学基座和温控策略,系统在模拟最恶劣轨道倾角环境条件下,其

(a) 波长为 $1\,540.56\text{ nm}$ 时,俯仰角与束散角的关系(b) 波长为 $1\,563.05\text{ nm}$ 时,俯仰角与束散角的关系(c) 波长为 $1\,540.56\text{ nm}$ 时,方位角与束散角的关系

李宽,王振,唐鑫科,等: 基于偏振光路的星载相干激光通信热控设计与验证



(d) 波长为 1 563.05 nm 时,方位角与束散角的关系

图 4 热平衡试验时的束散角

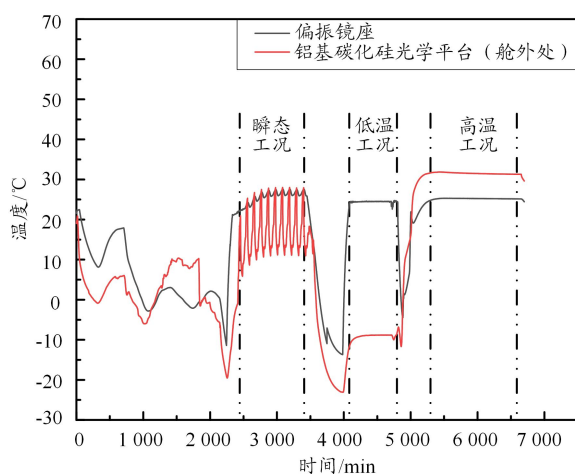


图 5 热平衡试验温度数据结果

铝基碳化硅光学平台在整个轨道周期内(瞬态工况时)的温度波动达到 17℃时(主要光学镜座的温度波动仅 1.6℃),这验证了热致偏振漂移抑制效果。

3 结束语

本文针对基于偏振光路的星载相干激光通信系统在极端空间热环境下的稳定运行,提出了一种基于偏振光路的星载相干激光通信热控设计方案,该方案采用被动与主动热控技术相结合的方式,通过热仿真分析与真空热平衡试验对设计进行了全面验证。实验结果表明,在 22 ± 3 ℃温度工况下,系统的偏振椭圆度始终保持在 95%以上,束散角稳定控制在 65 ± 5 μrad,满足了高精度星间通信的偏振保持要求。

本文不仅验证了偏振光路在复杂空间热环境下应用的可行性,还为深空探测、量子通信等对偏振保持有严格要求的空间光学系统提供了可工程化的热控设计范例。未来的研究将聚焦于在轨温度自适应补偿算法和新型超低膨胀材料的应用,旨在进一步提升系统在长时间任务周期内的稳定性与可靠性。

参考文献:

- [1] 马晶,韩琦琦,于思源,等. 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 228–232.
- [2] 祖继锋,刘立人,栾竹,等. 星间激光通信技术进展与趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(3): 7–10.
- [3] 刘百麟,胡帆杰,周佐新,等. 太阳窗口抑制空间激光通信天线在轨热致温度场扰动研究[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(2): 326–332.
- [4] XIE X, ZHOU Y, YU S, et al. Received power attenuation due to the wave-front aberrations induced by the receiving optical antenna in an inter-satellite laser communication link[J]. Optics Communications 2020, 463: 125371–1–125371–12.
- [5] KRENN A, YOUNGQUIST R, GIBSON T, et al. Development of a thermal control coating optimized for cryogenic space applications[C]//IEEE. Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. New York: IEEE, 2022: 012001–1–012001–11.
- [6] MIKHAILOV M M, LAPIN A N, YURYEV S A, et al. On the possibility of obtaining thermal control coatings for spacecraft by printing[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 310: 128472–1–128472–9.
- [7] DOWNER J, KABIR M, XU J. The design and development of a smart multilayer coating with variable emissivity capability for space vehicle thermal control systems[C]//IEEE. Proceedings of 2023 22nd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Orlando: IEEE, 2023: 1–12.
- [8] DARYABEIGI K. Thermal analysis and design of multi-layer insulation for re-entry aerodynamic heating[C]//AIAA. Proceedings of 35th AIAA Thermophysics Conference. Anaheim: AIAA, 2001: 2834–1–2834–9.
- [9] SINGH V K, SISODIA S S, PATEL A, et al. Thermoelectric cooler (TEC) based thermal control system for space applications: numerical study[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 120101–1–120101–12.
- [10] SHARMA S, DWIVEDI V K, PANDIT S N. A review of thermoelectric devices for cooling applications[J]. International Journal of Green Energy, 2014, 11 (9): 899–909.
- [11] NG V O, YU H, WU H A, et al. Thermal performance enhancement and optimization of two-phase closed thermosyphon with graphene-nanoplatelets coatings[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114039–1–114039–14.
- [12] WANG Z, CHENG P. Enhancements of absorption and photothermal conversion of solar energy enabled by surface plasmon resonances in nanoparticles and metamaterials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 453–482.
- [13] KONG X, SUN H, LIANG S, et al. Intelligent space thermal control radiator based on phase change material with partial visible transparency[J]. Coatings, 2024, 14 (5): 535–547.
- [14] 刘剑峰,韩琦琦,于思源,等. 卫星光通信终端二维转台运动参量对天线指向影响研究[J]. 宇航学报, 2007(4): 926–931.
- [15] 张庆. 基于太空辐射的星载天线在轨热性能分析与优化 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [16] 高兆江,王鑫,朱鸣. 高真空多层绝热材料层数对绝热性能影响[J]. 低温与超导, 2023, 51(8): 38–45.