

# 太阳窗光热特性对光通信天线热稳定性影响分析

胡帼杰 刘百麟 周佐新 李 健 刘绍然

中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094

**摘要** 地球同步轨道(GEO)星地激光通信终端为开敞式结构,其光通信天线裸露于卫星舱外,受交变剧烈的空间外热流影响,光通信天线符合温控要求的在轨有效工作时间每天仅有 4~6 h。基于现有热控技术基础,通过对太阳窗的设计削弱空间外热流的影响,改进系统热稳定性,并基于有限元分析得到使光通信天线系统热稳定性最佳的太阳窗光热特性参数优化设计,使其满足太阳透射率较高、吸收率较低,并且内、外表面红外发射率均较高的要求。采用上述太阳窗优化设计,光通信天线次镜可全天候满足温度指标,主镜全天中满足温度指标的时间可达 12 h,二者有效工作时间分别为基础方案(未采用太阳窗)的 3 倍和 2 倍。

**关键词** 光通信; 天线; 太阳窗; 光热特性; 热设计

中图分类号 TK121

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0706002

## Analysis of Thermal Stability of Laser Communication Antenna Influenced by Optical and Thermal Properties of Solar Window

Hu Guojie Liu Bailin Zhou Zuoxin Li Jian Liu Shaoran

*Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*

**Abstract** The geostationary earth orbits(GEO) satellite-borne laser communication terminal is of an open-type structure and the laser communication antenna is uncovered out of the satellite. The effective operation time of the antenna is only 4 to 6 hours per day due to the strictly alternate orbital heat flux changing. The solar window is designed to weaken the effect of the orbital heat flux and to improve the thermal stability of the laser communication antenna based on existing thermal control technology, and the optimal design of the optical and thermal properties is obtained by the finite element analysis method as the thermal properties of the laser communication antenna is most stable. The solar window has a larger solar transmission, smaller absorption and larger infrared emissivity for inner and external surfaces. The laser communication antenna secondary mirror can meet the temperature index on whole day and the main mirror can be used for 12 hours per day by utilizing the optimal designed solar window. The effective operation time of the secondary mirror and the main mirror are twice and triple respectively as much as the time of the basic case without the solar window.

**Key words** optical communications; antenna; solar window; optical and thermal properties; thermal design

**OCIS codes** 060.2605; 140.3460; 350.6830; 350.6050; 310.6845

## 1 引 言

在卫星通信领域,空间激光通信是一项全新的技术,与传统微波通信技术相比,光波段通信具有通信调制带宽大、通信安全性高、通信终端体积小、质量轻、功耗低且便于星载运行等优势。随着多媒体通信、民用航天观测等领域的迅猛发展,对高数据率、高清晰、高分辨率数据传输技术的需求日益迫切,传统微波通信的传输能力已远不能达到传输要求,而卫星激光通信技术<sup>[1-2]</sup>可满足这种发展需求,提供大容量、高分辨的通信新技术。美国、日本、欧洲一些国家是世界上最早开展空间激光通信研究的国家,始于 20 世纪 70 年代,至今

收稿日期: 2016-01-22; 收到修改稿日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(11404082)

作者简介: 胡帼杰(1985—),女,博士,工程师,主要从事热设计及换热流动优化方面的研究。

E-mail: hgi919@163.com

已进行了大量的低地球轨道-低地球轨道(LEO-LEO)星间<sup>[3]</sup>、低地球轨道-地球同步轨道(LEO-GEO)星间<sup>[4]</sup>、星-地<sup>[5]</sup>、月-地<sup>[6-8]</sup>等空间光通信系统实验验证,掌握了国际上先进的激光通信技术。我国2011年已成功实现了LEO星地激光通信搭载实验<sup>[9]</sup>,而GEO星地激光通信尚未实现搭载实验,仍处于基础技术研究探索阶段<sup>[10-11]</sup>。

激光通信终端光通信天线系统对温度指标要求严苛,较大的温度交变和温度梯度会导致光学天线镜面的热变形,从而影响激光通信链路的性能。因此,光通信天线系统温度控制是实现长时间激光通信的关键因素之一。德国基彭霍伊尔太阳物理研究所的Volkmer<sup>[12]</sup>、意大利帕多瓦大学的Segato<sup>[13]</sup>以及国内电子科技大学的李晓峰<sup>[14-16]</sup>、哈尔滨工业大学的宋义伟等<sup>[17-18]</sup>等都开展了相关的研究。国外一直严密封锁卫星激光通信的热控技术,公开发表的可借鉴资料甚少,尤其缺少详细的设计技术资料。从国外公布的激光通信系统组成推测预知,屏蔽空间太阳辐射热效应的有效手段通常有两个:热门或太阳窗口装置。热门虽然阻隔太阳辐射的效果较好,但同时也会彻底阻断有用的激光光波,因此热门不适合长期连续通信;而具有选择性滤波的太阳窗口装置,既能屏蔽太阳辐射又可透过有用光波,可用于长时间连续激光通信系统。2011年,美国麻省理工学院林肯实验室Pillsbury等<sup>[7-8]</sup>指出美国航空航天局(NASA)的月球激光通信终端采用太阳窗口的设计,削弱了终端与外部空间环境的热耦合,但论文中没有具体的设计原理、方案和参数选择,同时根据探月通信的结果可推测其并未实现长时间连续通信。

我国虽然在LEO星地激光通信终端研制和搭载实验中积累了LEO潜望式激光通信终端热控技术<sup>[19-21]</sup>,但LEO终端为封闭式结构,光通信天线置于卫星舱内,与GEO星地激光通信终端的构型和空间热环境截然不同。此外,GEO星地激光终端有每天24h连续通信的任务需求,系统指标要求也比LEO星地激光终端更高,因此二者的热控技术不具有可借鉴性。现有的热控措施无法避免空间热环境引起的GEO星地激光通信终端光通信天线系统的大幅温度振荡。根据已经得到的地面实验结果,光通信天线系统温度超标将导致激光通信终端在轨有效时间每天仅为4~6h,与每天24h的通信需求有较大差距。

基于现有热控技术基础,通过一种具有高效空间热屏蔽效应的太阳窗设计,可以削弱空间外热流对激光通信终端光通信天线系统热环境的影响,从而改进激光通信终端的热稳定性,延长其在轨有效工作时间。本文将基于有限元分析结果研究太阳窗光热特性对激光通信终端光通信天线系统热稳定性的影响,并对参数优化甄选,得到最有利于激光终端光通信天线系统热稳定性的太阳窗设计。

## 2 光通信天线介绍

GEO星地激光通信终端采用经纬仪式构型,主要由二维转台、光学平台与光通信天线三部分组成。其中,光通信天线由光学主镜、光学次镜、次镜支架、望远镜镜筒和遮光罩等组成,如图1所示。光学主镜和光学次镜均为玻璃材质,是光通信天线的核心部件,具有严格的恒温和温度均匀性要求,具体的温度控制指标如表1所示。

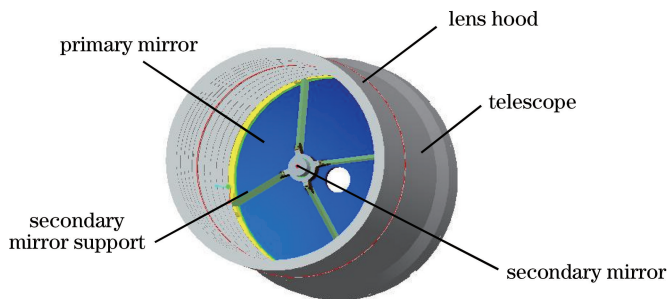


图1 光通信天线结构示意图

Fig. 1 Schematic of laser communication antenna structure

为实现星地通信,激光通信终端安装在卫星对地面,且光通信天线保持对地指向。由于激光终端所处的轨道情况和星上的安装位置,光通信天线所处安装面的外热流交变剧烈,如图2所示。

表 1 光通信天线温度控制指标

Table 1 Temperature control requirement for laser communication antenna

Working mode	Primary mirror		Secondary mirror	
	Temperature range	Temperature uniformity	Temperature range	Temperature difference from primary mirror
Preparation mode	23 °C ± 2 °C	≤ 2.5 °C	23 °C ± 4 °C	≤ 6.0 °C
Capture, tracking, communication mode	23 °C ± 2 °C	≤ 2.5 °C	23 °C ± 4 °C	≤ 6.0 °C
Maintenance mode	23 °C ± 2 °C	≤ 2.5 °C	23 °C ± 4 °C	≤ 6.0 °C
Sleep mode	23 °C ± 10 °C		13 ~ 60 °C	

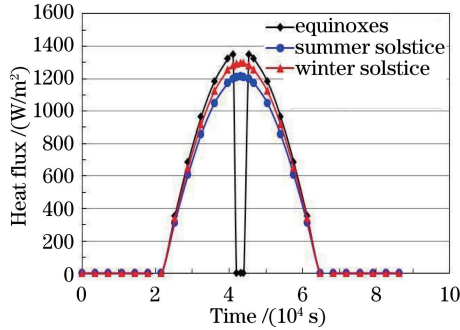


图 2 光通信天线安装面轨道外热流

Fig. 2 Orbital heat flux on instrument board of laser communication antenna

光通信天线有复杂的空间外热流环境和严苛的温控要求,因此其热控设计难度很高。现有热控措施主要包括:镜筒内表面涂覆消光漆(太阳吸收率  $\alpha_s$  为 0.85,红外发射率  $\epsilon_h$  为 0.85),外表面包覆多层隔热组件并采取主动控温;次镜采用热防护筒设计并进行主动控温;主镜表面采用金属镀层处理( $\alpha_s$  为 0.01,  $\epsilon_h$  为 0.01),主镜安装座采取主动控温。不过,根据已经得到的地面实验和热分析结果,上述热控措施仍无法避免光通信天线系统温度超标。

### 3 太阳窗光热特性初步设计及影响分析

设计一种激光可透过而太阳光被过滤的镀膜透镜窗口装置,即太阳窗,削弱轨道外热流的影响,改进光通信天线系统的热稳定性,延长其在轨期间可满足温控指标的有效工作时间。

太阳窗设计基于薄膜光学原理<sup>[22]</sup>,在具有高透射率的光学透镜表面镀滤光膜,对激光通信波段增透,而最大程度地通过反射滤掉太阳光谱其他波段,即可实现满足激光通信的太阳窗设计。太阳窗基底材料选用具有高透射率的熔石英或微晶玻璃质材料,每 5 mm 材料透射率不低于 0.999。经过初步力学分析,透镜初步设计为厚度 20 mm、 $\Phi 280$  mm ( $\Phi$  为直径)的圆盘熔石英玻璃透镜(有效口径为  $\Phi 250$  mm),初步计算透镜透射率约为 0.996,满足光学通信要求。

针对空间激光通信波段中心波长为 808 nm 及 1550 nm 多波段滤光膜的研制,国内外均进行了大量的基础研究<sup>[23-25]</sup>,其研究成果已经在工程上得到了推广应用,其中以长春理工大学的研究成果<sup>[23-24]</sup>最具代表性。本文直接选用付秀华等<sup>[23]</sup>研制的具有如图 3 所示光谱特性的激光通信多波段滤光膜。由图 3 可知,808 nm 处透射率为 98.33%,600~790 nm 和 830~1450 nm 的平均透射率为 0.146%,1550 nm 处透射率为 99.17%,满足激光通信的使用要求。

对于太阳光谱分析,具有辐照能量的太阳光谱范围为 120~1000  $\mu\text{m}$ ,图 3 给出了在激光通信波段 600~1600 nm 范围内滤光膜的光谱曲线,对于小于 600 nm 和大于 1600 nm 的其他光谱特性进行如下理论分析:

- 1) 小于 400 nm 的紫外光谱区能量仅占太阳辐射能量的 7% 左右,按 10% 反射的保守估算,此光谱区最大透射或表面吸收的能量不大于太阳辐射能量的 6.3%;
- 2) 小于 600 nm 和大于等于 400 nm 的可见光谱区能量约占太阳辐射能量的 26.9%,滤光膜对此光谱波

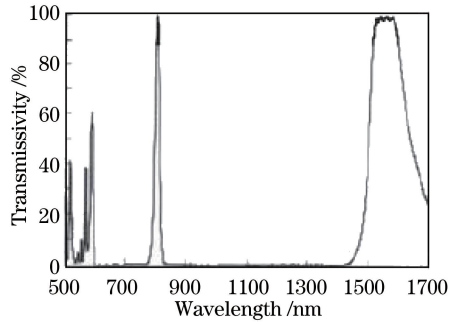


图 3 太阳窗光谱测试曲线<sup>[23]</sup>(600~1600 nm 波段)

Fig. 3 Test spectral curve of solar window<sup>[23]</sup> (wavelength between 600 nm and 1600 nm)

段的平均反射率为 95.81%，此光谱区最大透射或表面吸收的能量不大于太阳辐射能量的 1.13% ( $4.19\% \times 26.9\%$ )；

3) 大于 1600 nm 的红外光谱区能量约占太阳辐射能量的 11.38%，按 10% 反射的保守估算，此光谱区最大透射或表面吸收的辐射能量不大于太阳辐射能量的 10.24%。

综上，采用太阳窗后，通过窗口进入光通信天线系统内的太阳辐射能量最多占太阳辐射总能量的 17.82% ( $0.146\% + 6.3\% + 1.13\% + 10.24\% = 17.82\%$ )，与不采用太阳窗的激光通信终端系统相比，将使进入到光学系统内的太阳辐射热能量降低 82% 左右，空间热屏蔽效果显著，可见太阳窗设计对光通信天线系统温度场稳定性的提高具有重要作用。

针对太阳光谱的紫外、红外波段的辐照入射强度分析，通过截止紫外、红外波段中高辐照强度波段的方法，可进一步降低透过太阳窗进入光学系统内的太阳辐射能量，根据分析结果可进一步对滤光膜设计进行适当的改进完善。

## 4 太阳窗光热特性优化设计

根据第 3 节的太阳窗初步设计和影响分析，太阳窗设计为厚度 20 mm、 $\Phi 280$  mm 的圆盘形熔石英玻璃透镜，通过结构压圈以螺接的方式隔热安装于光学镜筒前端，窗口朝向冷黑空间的外表面镀滤光膜，镀滤光膜后  $\tau$  (透射率) 与  $\alpha_s$  (太阳吸收率) 之和约为 0.178。本节将基于在轨热分析，根据不同光热特性的太阳窗对激光通信终端光通信天线系统热稳定性影响的分析结果，对太阳窗的透射率、太阳吸收率和红外发射率等光热特性参数进行详细优化设计。

### 4.1 有限元建模及验证

对于在轨热分析，需要对激光终端和星体进行整体有限元建模。图 4 为建立的星体和激光终端有限元模型。

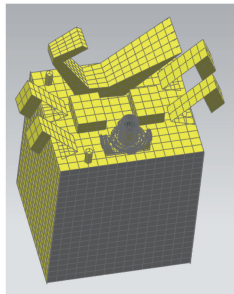


图 4 整星有限元模型

Fig. 4 Finite element model of whole spacecraft

为了对太阳窗的效果进行比对分析，需要对未采用太阳窗及采用太阳窗的激光终端均进行有限元建模分析。图 5 为未采用太阳窗及采用太阳窗的激光终端有限元模型。未采用太阳窗的方案为基础方案，主要

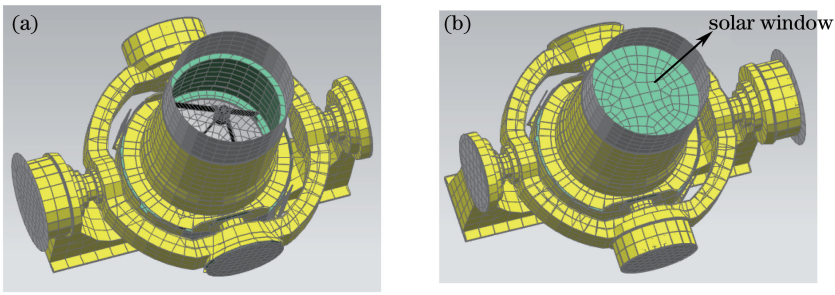


图 5 激光通信终端有限元模型。(a) 未采用太阳窗；(b) 采用太阳窗

Fig. 5 Finite element model of laser communication terminal. (a) Without solar window; (b) with solar window

热控状态如第 2 节中所述。采用太阳窗的方案中,太阳窗的热控状态和与镜筒、遮光罩的热耦合关系如前所述,其他部件的热控状态均与基础方案相同。

根据已经得到的基础方案地面实验结果,目前热控瓶颈主要是光通信天线系统温度上限指标的控制,因此文中确定的计算工况为 2 个高温工况。此外,为了验证建立的有限元模型,计算了一个转移轨道低温工况,用于与基础方案地面实验结果进行对比。具体的热分析计算工况设置如表 2 所示。

表 2 热分析计算工况

Table 2 Simulation cases of thermal analysis

Stage	Working mode	Active thermal control	Thermal boundary / $^{\circ}\text{C}$	Remarks
Summer solstice	Operating for 24 h per day	Open	40	The worst hot case, end of life
Spring equinox	Operating for 24 h per day	Open	40	The worst hot case, end of life
Transfer orbit	Inoperative	Open	-5	The worst cold case, without external heat flux

图 6 和图 7 分别为基础方案转移轨道低温工况主、次镜温度的计算结果以及地面实验结果。从图中可以看到,计算得到的热分析结果与地面实验结果误差小于  $2^{\circ}\text{C}$ ,即验证了所建立的热分析模型的准确性。

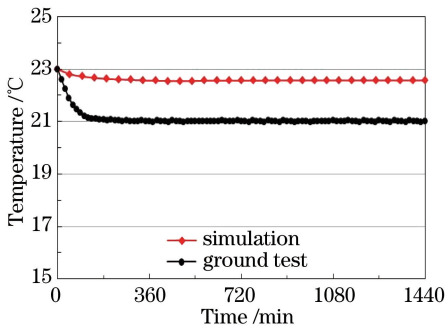


图 6 基础方案转移轨道低温工况主镜平均温度曲线  
Fig. 6 Average temperature evolutions of primary mirror over time for basic scheme simulation and ground test in the worst cold case

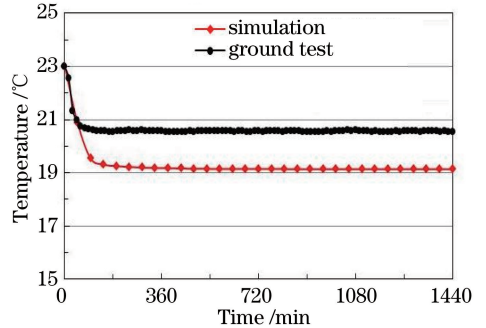


图 7 基础方案转移轨道低温工况次镜平均温度曲线  
Fig. 7 Average temperature evolutions of secondary mirror over time for basic scheme simulation and ground test in the worst cold case

#### 4.2 太阳吸收率和透射率优化设计

太阳窗初步设计为太阳吸收率与透射率之和,为 0.178,下面针对不同的太阳吸收率与透射率取值组合开展有限元分析,并根据模拟结果得出太阳吸收率和透射率的优化设计。为得到具有普适意义的结论,分别对基于两种工况以及不同的太阳窗表面红外发射率进行对比。表 3 为设置的对比方案及模拟得到的主、次镜温度满足温控指标时长的计算结果,其中太阳窗外表面为朝向冷黑空间的面,内表面为朝向光学镜筒内的面。

表 3 太阳窗的太阳吸收率和透射率优化设计的对比方案计算结果

Table 3 Simulation results of optimization design schemes for solar absorption and transmission of solar window

Case	Serial number of scheme	Emissivity of external surface	Emissivity of internal surface	Solar absorption	Transmission	Effective operation time (h/day)		
						Primary mirror	Secondary mirror	Both primary and secondary mirror
1	1-1			without solar window		12	8	6
1	1-2	0.04	0.04	0	0.178	6	10	6
1	1-3	0.04	0.04	0.04	0.138	6	10	6
1	1-4	0.04	0.04	0.059	0.119	6	10	6
1	1-5	0.04	0.04	0.089	0.089	6	10	6
1	1-6	0.04	0.04	0.119	0.059	6	10	6
1	1-7	0.04	0.04	0.178	0	6	8	6
1	1-8	0.8	0.8	0	0.178	12	24	12
1	1-9	0.8	0.8	0.059	0.119	10	18	10
1	1-10	0.8	0.8	0.089	0.089	10	18	10
1	1-11	0.8	0.8	0.119	0.059	10	16	10
1	1-12	0.8	0.8	0.178	0	10	16	10
1	1-13	0.8	0.04	0	0.178	8	14	8
1	1-14	0.8	0.04	0.089	0.089	8	14	8
1	1-15	0.8	0.04	0.178	0	8	12	6
2	1-1			without solar window		12	8	6
2	1-2	0.04	0.04	0	0.178	8	12	8
2	1-4	0.04	0.04	0.059	0.119	8	12	8
2	1-5	0.04	0.04	0.089	0.089	8	12	8
2	1-6	0.04	0.04	0.119	0.059	8	12	8
2	1-7	0.04	0.04	0.178	0	8	10	8
2	1-8	0.8	0.8	0	0.178	12	24	12
2	1-9	0.8	0.8	0.059	0.119	12	24	12
2	1-10	0.8	0.8	0.089	0.089	12	24	12
2	1-11	0.8	0.8	0.119	0.059	12	20	12
2	1-12	0.8	0.8	0.178	0	12	16	12
2	1-13	0.8	0.04	0	0.178	8	14	8
2	1-14	0.8	0.04	0.089	0.089	8	14	6
2	1-15	0.8	0.04	0.178	0	8	12	6

分析两种工况以及三种表面红外发射率取值得到的模拟结果可以得到：

1) 所有采用太阳窗的方案,次镜满足温度指标的时长均比未采用太阳窗的基础方案有所增加。这是由于次镜座表面喷涂消光漆(光学通信需要),受外热流波动影响明显,太阳窗明显削弱了次镜座吸收的外热流;此外,次镜上方(靠近太阳窗一侧)安装了次镜热防护筒并覆盖了多层隔热组件,这也会在一定程度上削弱太阳窗自身温度变化对次镜的影响;同时,次镜的温度控制范围较宽( $\pm 4\text{ }^\circ\text{C}$ ),削弱外热流波动的优化作用较为明显地体现为次镜满足指标时长的增加。

2) 两种工况和三种表面红外发射率组合的结果均表明,当太阳窗的太阳吸收率较小、透射率较大时,次镜满足指标的时长以及主、次镜同时满足指标的时长均较长,次镜满足指标的时长最长可达到每天 24 h,主、次镜同时满足指标时长可达到每天 12 h(内、外表面红外发射率均取 0.8、太阳吸收率取 0、透射率取 0.178),分别是基础方案满足指标时长的 3 倍和 2 倍。

3) 当太阳窗内表面或外表面红外发射率较小(如取 0.04)时,主镜满足的指标时长相对于基础方案的时长没有增加。通过分析太阳窗的自身温度变化发现,红外发射率较小时受照的太阳窗自身温度会高达  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ,远高于 4 K 的冷黑空间温度,即光通信天线系统的辐射环境温度明显提高。此时主镜、次镜及镜筒(根据光学通信需求内表面喷涂消光漆)等部件的温度变化是外热流削弱和辐射环境温度提高两个因素综合

作用的结果。根据前面分析,包覆多层隔热组件的次镜热防护筒会一定程度上削弱太阳窗温度变化对次镜的影响,但喷涂消光漆的镜筒会受高温的太阳窗的影响,而镜筒与主镜之间有热耦合关系,从而使主镜温度高出工作温度上限而变得不可控;同时,主镜的温控范围较窄( $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),主镜温度的升高会较为明显地表现为满足温控指标时长的减小。

综上,在太阳窗的太阳吸收率与透射率之和约为 0.178 的前提下,应尽量选择太阳吸收率较低、透射率较高的太阳窗光热特性设计。

### 4.3 红外发射率优化设计

从前面的结果可以看到,太阳窗的红外发射率对光通信天线系统的温控效果有明显的影 响,为了更清晰地反映太阳窗红外发射率的影响规律并进行优化甄选,固定太阳吸收率为 0,透射率为 0.178,针对不同的外表面和内表面红外发射率取值进行热分析计算,根据热分析结果得出红外发射率的优化设计。为了得到具有普适意义的结论,分别对基于两种工况进行对比。表 4 为设置的对比方案及模拟得到的主、次镜温度满足温控指标时长的计算结果。

表 4 红外发射率优化设计的对比方案计算结果

Table 4 Simulation results of optimization design schemes for infrared emissivity of solar window

Case	Serial number of scheme	Emissivity of external surface	Emissivity of internal surface	Solar absorption	Transmission	Effective operation time (h/day)		
						Primary mirror	Secondary mirror	Both primary and secondary mirror
1	1-1		without solar window			12	8	6
1	1-2	0.04	0.04	0	0.178	6	10	6
1	2-1	0.2	0.04	0	0.178	8	12	8
1	2-2	0.5	0.04	0	0.178	8	12	8
1	1-13	0.8	0.04	0	0.178	8	14	8
1	2-3	0.8	0.2	0	0.178	8	16	8
1	2-4	0.8	0.5	0	0.178	8	20	8
1	1-8	0.8	0.8	0	0.178	12	24	12
2	1-1		without solar window			12	8	6
2	1-2	0.04	0.04	0	0.178	8	12	8
2	2-1	0.2	0.04	0	0.178	8	12	8
2	2-2	0.5	0.04	0	0.178	8	12	8
2	1-13	0.8	0.04	0	0.178	8	14	8
2	2-3	0.8	0.2	0	0.178	10	20	10
2	2-4	0.8	0.5	0	0.178	12	24	12
2	1-8	0.8	0.8	0	0.178	12	24	12

分析两种工况的模拟结果可以得到:

1) 当太阳窗内表面红外发射率较小时,主镜满足指标时长相比基础方案的时长没有改进(原因如 4.2 节分析可知),此时提高外表面红外发射率,主镜温度响应有所改善(在模拟得到的主镜温度曲线上有所体现),不过由于改善幅度不大,因此主镜温度指标满足时长没有明显增加。

2) 当太阳窗内表面红外发射率较大时,主镜满足温度指标时长随着外表面红外发射率的增大而增加,最大增加量为每天 4 h。

3) 当太阳窗内、外表面红外发射率同步增大时,主、次镜满足温度指标时长均有较明显的增加。

综上,太阳窗外表面和内表面红外发射率越大(大于 0.5),主、次镜满足温度控制指标的时长越长。当内、外表面红外发射率均取 0.8、太阳吸收率取 0、透射率取 0.178 时,次镜满足温度指标的时长为每天 24 h,主、次镜同时满足温度指标的时长为每天 12 h,比基础方案(未采用太阳窗)满足温度指标的有效工作时长增长 1 倍。为了清晰地显示两组方案主、次镜温度结果的差别,图 8 和图 9 分别给出了末期春分上述最佳方案和基础方案的主、次镜最高温度曲线。图中“SW”表示太阳窗,“( )”中列出的 4 个参数(用“,”区隔)依次为

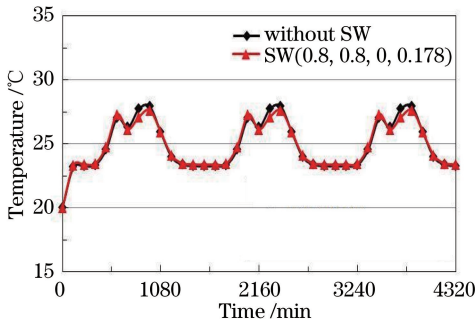


图 8 末期春分高温工况主镜最高温度曲线

Fig. 8 Maximum temperature evolutions of primary mirror over time at spring equinox in the end of lifetime (the worst hot case)

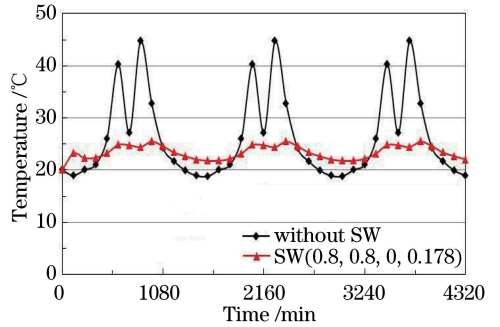


图 9 末期春分高温工况次镜最高温度曲线

Fig. 9 Maximum temperature evolutions of secondary mirror over time at spring equinox in the end of lifetime (the worst hot case)

外表面红外发射率、内表面红外发射率、太阳吸收率和透射率。

从上述结果可以看到,通过太阳窗的设计,GEO 星地激光通信终端光通信天线系统的热稳定性得到明显改善,有效工作时长显著增长,特别是光学次镜,采用上述太阳窗光热特性的最佳设计方案时次镜可全天候满足温度控制指标。后续将通过改进光学镜筒、主镜安装座等的系统热设计,进一步延长主镜有效工作时长。

## 5 结 论

为提高 GEO 星地激光通信终端的温控精度,延长其在轨有效工作时间,提出了一种具有高效热屏蔽效应的太阳保护窗口装置的设计方案,可实现透过激光而滤过太阳光的效果。通过膜系设计得到太阳窗的太阳吸收率与透射率之和约为 0.178,可使进入光学系统内的太阳辐射能量降低 82%左右,空间热屏蔽效果显著,从而可以有效地改进激光终端光通信天线系统的热稳定性。基于有限元分析还研究了太阳窗的光热特性参数对光通信天线系统热稳定性的影响规律,并得到了光热特性参数的优化设计,即太阳窗透射率较高、太阳吸收率较低,并且内、外表面红外发射率均较高时,系统热稳定性较佳;当内、外表面红外发射率均取 0.8、太阳吸收率取 0、透射率取 0.178 时,太阳窗可使主、次镜同时满足温度指标的时长达到每天 12 h,次镜单独满足温度指标的时长达到每天 24 h,分别是不采用太阳窗的基础方案时长的 2 倍和 3 倍。

## 参 考 文 献

- 1 Tan Liying, Ma Jing. Satellite optical communications technology[M]. Beijing: Science Press, 2004: 12-25.  
谭立英, 马 晶. 卫星光通信技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 12-25.
- 2 Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, *et al.*. Development progress and trends of space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.  
白 帅, 王建宇, 张 亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
- 3 Garaymovich N P, Grigoriev V N, Huppenen A P, *et al.*. Free-space laser communication systems: Internationally and in Russia[C]. SPIE, 2001, 4354: 197-203.
- 4 Gregory M, Heine F, Kämpfner H, *et al.*. Tesat laser communication terminal performance results on 5.6 Gbit coherent inter satellite and satellite to ground links[C]. International Conference on Space Optics, 2010: 1-5.
- 5 Wilson K E, Kovalik J, Biswas A, *et al.*. Development of laser beam transmission strategies for future ground-to-space optical communications[C]. SPIE, 2007, 6551: 65510B.
- 6 Boroson D M, Robinson B S, Burianek D A, *et al.*. Overview and status of the lunar laser communication demonstration [C]. SPIE, 2012, 8246: 82460C.
- 7 Burnside J W, Conrad S D, Pillsbury A D, *et al.*. Design of an inertially stabilized telescope for the LLCD[C]. SPIE, 2011, 7923: 79230L.
- 8 Nevin K E, Doyle K B, Pillsbury A D. Optomechanical design and analysis for the LLCD space terminal telescope[C]. SPIE, 2011, 8127: 81270G.



- 9 新华社. 国防科工局: 海洋二号卫星工程创造五个"第一"[EB/OL]. (2011-08-16)[2015-12-15] [http://www.gov.cn/jrzq/2011-08/16/content\\_1926728.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2011-08/16/content_1926728.htm).
- 10 Zheng Yang, Fu Yuegang, Hu Yuan, *et al.*. Research on four-mirror dynamic alignment based on space laser communication link networks[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105001.  
郑 阳, 付跃刚, 胡 源, 等. 基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105001.
- 11 Wu Feng, Yu Siyuan, Ma Zhongtian, *et al.*. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite-ground laser communication links[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605008.  
武 凤, 于思源, 马仲甜, 等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605008.
- 12 Volkmer R. Thermal characteristics of the solar telescope GREGOR[C]. SPIE, 2008, 7012: 70120K.
- 13 Segato E, Deppo V D, Debei S, *et al.*. Method for studying the effects of thermal deformations on optical systems for space application[J]. Applied Optics, 2011, 50(18): 2836-2845.
- 14 Li Xiaofeng, Wang Bo, Hu Yu. Influence of mirror thermal distortion in thermosphere to space-to-ground laser communication links[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 581-585.  
李晓峰, 汪 波, 胡 渝. 在轨运行热环境下的天线镜面热变形对空地激光通信链路的影响[J]. 宇航学报, 2005, 26(5): 581-585.
- 15 Li Xiaofeng. Influence of mirror thermal distortion on performance of space-to-ground laser communication links[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 369-372.  
李晓峰. 镜面热变形对空地激光通信链路性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 369-372.
- 16 Li Xiaofeng. Finite element analysis of mirror thermal distortion within the sun shadow in space-to-ground laser communication links[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17(2): 183-186.  
李晓峰. 空地激光通信星载光学天线在太阳阴影区的镜面热变形有限元分析[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 183-186.
- 17 Song Yiwei, Yu Siyuan, Tan Liying, *et al.*. The effects of temperature distribution in space on the figure of reflectors[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 868-874.  
宋义伟, 于思源, 谭立英, 等. 空间温度场对平面反射镜面形影响研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 868-874.
- 18 Tan Liying, Song Yiwei, Ma Jing, *et al.*. Effects of temperature distribution on performance of SiC reflectors in periscopic laser communication terminals[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2545-2550.  
谭立英, 宋义伟, 马 晶, 等. 温度对潜望式激光通信终端 SiC 反射镜性能影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2545-2550.
- 19 Meng Henghui, Tan Canghai, Geng Liyin, *et al.*. Thermal control design and analysis for laser communication terminal[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(9): 1222-1227.  
孟恒辉, 谭沧海, 耿利寅, 等. 激光通信终端主体热设计与热分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(9): 1222-1227.
- 20 Meng Henghui, Geng Liyin, Li Guoqiang. Thermal control design and experiment for laser communication equipment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2295-2299.  
孟恒辉, 耿利寅, 李国强. 激光通信器热设计与热试验[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2295-2299.
- 21 Yang Huabin, Wu Qingwen, Yang Xianwei, *et al.*. Design and simulation for thermal shield installed on rotating shaft of spacecraft[J]. Computer Simulation, 2014, 31(1): 58-63.  
杨化彬, 吴清文, 杨献伟, 等. 航天器转动轴遮热罩设计及仿真[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 58-63.
- 22 Fan Zhengxiu. Development and recent progress of optical thin films[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900131.  
范正修. 光学薄膜及其进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900131.
- 23 Fu Xiuhua, Mo Zhaoyan, Huang Jinlong, *et al.*. Design and fabrication of near space laser communication link optical system filter film[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0907003.  
付秀华, 莫朝燕, 黄金龙, 等. 临近空间激光通信链路光学系统中滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0907003.
- 24 Fu Xiuhua, Kou Leilei, Zhang Jing, *et al.*. Fabrication of optical filter film for visible and near-infrared laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1207001.  
付秀华, 寇雷雷, 张 静, 等. 可见与近红外激光通信系统光学滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1207001.
- 25 Zhang Jinsheng, Zhang Jinlong, Ning Yongqiang, *et al.*. Design and optimization of 1555 nm broad-band pass filter film[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 557-562.  
张金胜, 张金龙, 宁永强, 等. 1555 nm 宽带通滤光膜的设计和优化[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 557-562.