

GEO 激光通信光端机遮光罩优化设计

李小明^{1,2} 张立中^{1*} 韩 成³ 刘伟达⁴ 杨献伟⁵ 姜会林¹

¹空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

³长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022

⁴长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

⁵中国科学院长春精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 地球同步卫星(GEO)激光通信系统的光学天线暴露在卫星外部, 太阳辐射会对光学天线产生严重的影响, 造成可通率下降, 尤其阳光直接照射天线主镜时系统必须采取规避措施, 影响更加严重。采用遮光罩可以改善太阳热效应对光学天线的影响, 但受尺寸等限制, 其效果有限。根据 GEO 对地激光通信系统的结构和环境特点, 分析太阳对光学天线主镜的辐照情况, 设计一种在传统圆筒遮光罩内部增加栅板的改进型遮光罩, 减小太阳光的直射角度范围。结合热控设计, 对系统在太阳辐照环境下天线光学元件的温度变化情况及可通率进行仿真分析。分析表明采用改进型遮光罩后, 系统的可通率由采用传统遮光罩时的 93% 提高到 99.5%, 基本达到全天时工作, 极大地减小了系统的不可通时间, 提高了链路的可用性。

关键词 光通信; 改进型遮光罩; 内部栅板; 可通率; 热效应

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0905006

Design of Optimization-Baffle for GEO Laser Communication

Li Xiaoming^{1,2} Zhang Lizhong¹ Han Cheng³ Liu Weida⁴ Yang Xianwei⁵ Jiang Huilin¹

¹National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

²College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

³College of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

⁴College of Mechatronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

⁵Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The optical antenna of geosynchronous earth orbit (GEO) laser communication system exposes outside of satellite. Solar radiation affects the optical system seriously, and reduces available probability. The effect is more serious when the sun directly shine the primary mirror. The baffle can reduce the effect, but it is limited by the fairing's size of rocket. By researching the characteristics of the GEO laser communication and analyzing the situation of primary mirror shined by the sun, a modified baffle with internal grids is designed to reduce the effect of the sun. Then the optical-device's temperature and the available probability of the system combined the thermal control design are analysed. The results show that the available probability is improved

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-04-30

基金项目: 国家 863 计划(2012AA0017)

作者简介: 李小明(1984—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事空间无线激光通信、结构优化设计与分析方面的研究。

E-mail: lxm Kidd@163.com

*通信联系人。E-mail: zlcust@126.com

from 93% with traditional baffle to 99.5% with the improved baffle. The GEO laser communication system can almost work all day with the modified baffle.

Key words optical communications; optimization-baffle; internal grid; available probability; thermal effects

OCIS codes 060.4510; 140.6810; 120.6085; 280.6780

1 引言

激光通信系统具有通信速率高、抗干扰能力强、通信功耗小等优点,是星间、星地高速通信的有效手段,应用前景良好^[1],尤其应用在地球同步中继通信卫星(GEO)上,可以解决微波通信带宽低、制约海量数据传输的难题^[2]。GEO卫星搭载的激光通信光学天线安装在星体外部,会受到太阳的直接照射。阳光从主镜筒进入光学天线后,光学系统受辐照温度上升,产生热变形,导致性能下降,尤其当太阳直接照射到系统主镜上时会引起主镜膜系损伤,造成系统无法工作,甚至永久失效^[3-5],阳光对主镜的直接照射只能采取规避措施避免,这将造成系统在特定时间段内长时间通信中断,严重影响系统的可通率^[6]。而且卫星轨道和通信地面站位置固定,不可通信时间能够准确预测并被敌方利用,这将使我方非常被动。现在国内外抑制太阳辐照影响的方法主要是增加遮光罩长度,减小太阳光直接照射入光学系统的角度^[7]。一种方法是采用更长的遮光罩,但受发射时火箭整流罩包络尺寸的限制,无法达到理想长度,实际使用中抑制效果受到严重影响^[8]。另一种方法是采用可伸展遮光罩,在火箭发射时遮光罩收起,满足火箭整流罩对系统尺寸的要求,卫星入轨后,遮光罩展开伸长,增强对太阳辐照的抑制效果^[9]。但是可伸展遮光罩结构复杂、加工困难,而且由于存在伸展结构,可靠性降低,严重影响系统可靠性,因此在实际星载系统中应用较少。

为了在不增加发射难度、不影响系统可靠性的前提下,提高GEO激光通信系统的可通率,本文设计一种GEO星载激光通信系统改进型遮光罩,与传统遮光罩外包络尺寸相同时能进一步减小太阳光直射到天线主镜的角度范围,降低太阳光直射引起的热效应对光学系统的影响,提高系统的可通率,保证系统基本可以全天时工作,提高使用效能。

2 GEO激光通信光学天线

搭载在GEO卫星的对地激光通信系统视轴始终指向地球,地球相对GEO卫星的张角为 20° ,远大于激光通信中的最大视场角(0.23°),所以基本上无太阳光直射和其他点源(如行星、恒星等)进入中继光学系统,其主要天空背景光为地球反射的太阳光^[10]。对于激光通信系统,信标光接收波段为800 nm、通信光波段为1550 nm,其所对应地球反射的天空背景辐射谱密度分别为 $\psi(800\text{ nm})=1.6\times 10^{-3}\text{ W/cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m}$ 和 $\psi(1500\text{ nm})=0.5\times 10^{-3}\text{ W/cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m}$ 。系统接收口径为 $D=0.25\text{ m}$,窄带滤光片带宽为 $\Delta\lambda=2\text{ nm}$,信标光接收探测器单个像素对应视场为 $4\mu\text{rad}$,通信接收视场为 $100\mu\text{rad}$,对应天空背景光强分别为 $0.5\times 10^{-14}\text{ W}$ 和 $9.6\times 10^{-12}\text{ W}$ 。远小于接收到信标光和通信光的光功率($0.54\times 10^{-9}\text{ W}$ 和 $2.7\times 10^{-7}\text{ W}$),同时光学天线设计时,增加了内部光阑消除外部杂光。因此,相对于太阳照射造成的系统规避对可通率的影响,背景辐射影响较小。

某GEO对地激光通信系统的激光通信光端机由跟瞄机构(二维转台)和采用卡塞格林式光学系统的光学天线组成。光学天线为长焦、小视场的光学能量系统而非成像系统,天线接收能量的效率是其主要参数。天线主要由主镜室、主镜、次镜支架、次镜、遮光罩和中继光学系统组成,主镜材料为碳化硅,采用背部安装方式安装在主镜室内,次镜材料为微晶玻璃,采用钢制材料的次镜支架支撑,系统采用碳纤维材料的传统圆筒遮光罩,如图1所示。受到发射火箭整流罩包络尺寸的限制,遮光罩总长度为600 mm,前端距次镜端面为380 mm,通光口径为 $\Phi 252\text{ mm}$ 。激光通信光端机主体安装在卫星平台面向地面的星体表面外部,主光学天线的温控要求:主镜温度水平为 $20\text{ }^\circ\text{C}\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$,次镜温度水平为 $20\text{ }^\circ\text{C}\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$,温度均匀性优于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

采用上述传统遮光罩时,通过分析当太阳入射角(阳光与天线光轴夹角)小于 22.6° 时,太阳光会直接照射到光学天线的主镜上,引起的热效应会对膜系产生一定的影响,降低通信质量和系统寿命,因此必须采取规避措施。分析表明,在太阳规避角(阳光与系统光轴夹角小于该角度时必须采取规避措施)为 22.6° 时,GEO(77°E)对阿里地面站($32^\circ 33' 57.82''\text{N}$, $80^\circ 09' 35.14''\text{E}$,海拔高度为5036 m)通信时,全年共279天需采取太阳规避,占全年总天数的76.4%。系统规避太阳引起的全年不可通信时间约为36330 min,全年可通率93%,可见

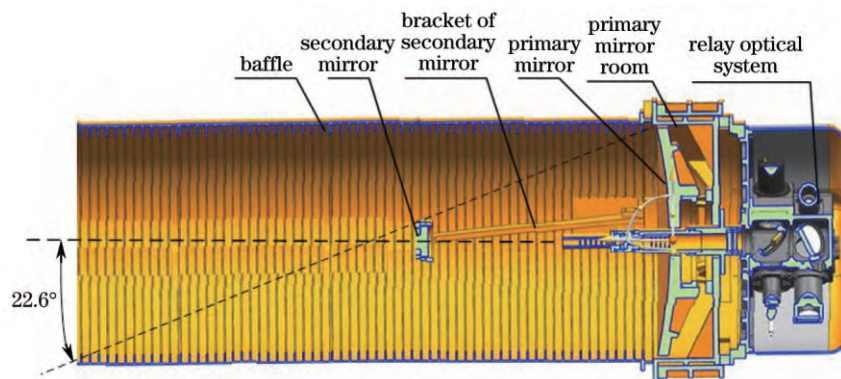


图1 GEO激光通信光端机光学系统示意图

Fig.1 Optical system of GEO laser communication

太阳规避对系统的可通率有严重的影响。表1为规避角为22.6°时系统规避太阳造成的全年各月不可通时间分析结果。

表1 采用传统遮光罩时系统太阳规避造成的全年不可通时间

Table 1 Unavailable time of the year for avoiding the sun with traditional baffle

COM-link	Object	Result					
		Month	Unavailable day /day	Unavailable time /min	Available probability of the month /%	Max unavailable time /min	
GEO (77°E)——Ali evading angle 22.6°	Unavailable time for avoiding the sun /min	1	31	4202	90.6	145	
		2	28	4366	89.2	150	
		3	31	3731	91.6	70	
		4	30	3616	91.6	140	
		5	9	571	98.7	80	
		8	28	2546	94.1	140	
		9	30	3770	91.3	120	
		10	31	4971	88.9	180	
		11	30	4516	89.5	170	
		12	31	4041	90.9	125	
		total	279	36330			
		Available probability of the year			93%		

3 改进型遮光罩设计

为了减小太阳规避角,缩短规避太阳造成的不可通时间,提高系统可通率,对传统的圆筒形遮光罩进行了改进设计。在遮光罩内部设计平行于光学系统光轴的内部栅板。由于GEO对地面激光通信时,星载光端机的光轴矢量相对于地球基本保持不变,随着地球的自转,太阳基本从东西方向照射入遮光罩内。因此,设计时遮光罩内部栅板沿南北方向布置,减小太阳光直接照射主镜的能量,如图2所示。

栅板距离的减小有利于减小太阳直接照射主镜时的角度,但是减小栅板间距,增加栅板数量,会使遮挡率增加,而且栅板间距过近造成了栅板散热能力下降,会对光学系统形成二次热辐射。通过分析极端高温瞬态工作工况下不同栅板间距时,主、次镜受太阳照射温度变化情况,发现栅板间距为65 mm时效果最优,如图3、4所示。因此,在遮光罩内部等间距布置3块栅板,高度为370 mm,厚度为2 mm,同时在遮光罩外部布置散热面,降低遮光罩温度,并采用隔热处理安装到主光学天线上,如图5所示,采用该遮光罩后太阳直接照射到主镜上的入射角为9.6°。

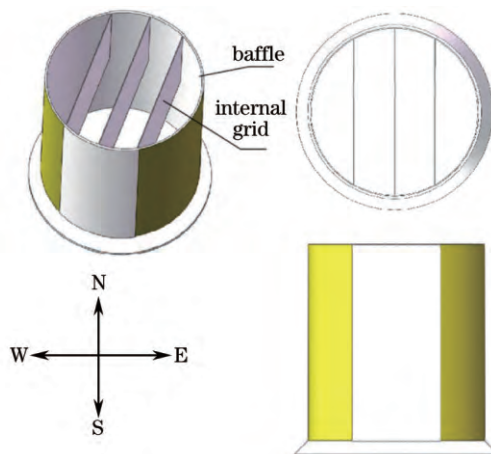


图2 改进遮光罩示意图

Fig.2 Modified baffle

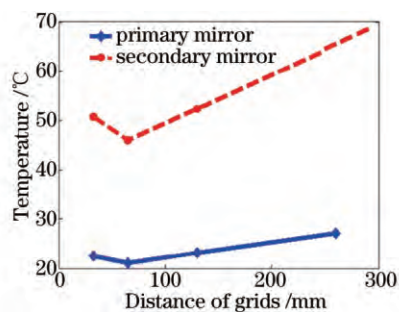


图3 春分时栅板间距对主、次镜温度影响

Fig.3 Distance of grids at vernal equinox and main/second mirror temperature

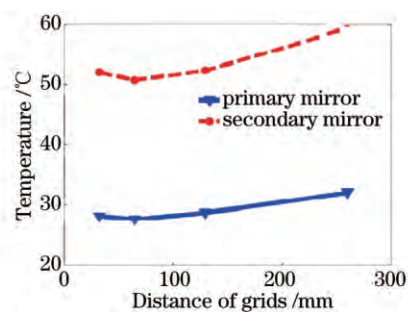


图4 冬至时栅板间距时主镜、次镜温度影响

Fig.4 Distance of grids at winter solstice and main/second mirror temperature

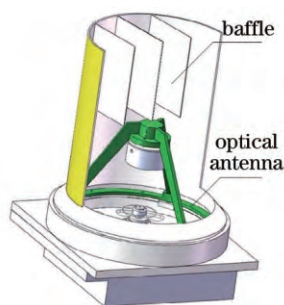


图5 改进遮光罩安装示意图

Fig.5 Install of the modified baffle

激光通信系统与传统的成像系统不同,1) 激光通信系统为能量系统,接收能量效率是其光学系统的主要性能参数;2) 激光通信光学系统视场角远小于一般的对地成像系统^[11](GEO 激光通信跟踪系统最大视场角为 0.23°)。所以,重点分析栅板对能量的影响,栅板对能量的遮挡率为

$$A = \frac{(\tan \alpha \times h + b) \times (l_1 + l_2 + l_3)}{\pi R^2}, \quad (1)$$

式中 A 为遮挡率, α 为最大视场角, h 为栅板高度, b 为栅板厚度, l_1 、 l_2 、 l_3 为栅板长度, R 为遮光罩通光口半径。根据光学系统视场角和栅板结构尺寸,计算得到栅板对激光能量的最大遮挡率约为 3%。

采用长度均为 600 mm 的传统遮光罩和改进型遮光罩时,系统主镜在极端高温瞬态工况下的温度变化如图 6 所示,可见采用本文设计的遮光罩后,同等条件下太阳辐射对主镜温度的影响明显减弱,主镜最高温度由约 210 °C 下降为约 100 °C,一天内主镜最高温度超过热控要求 (20 °C ± 5 °C) 的时间由约 10000 s 减小为约 6000 s。

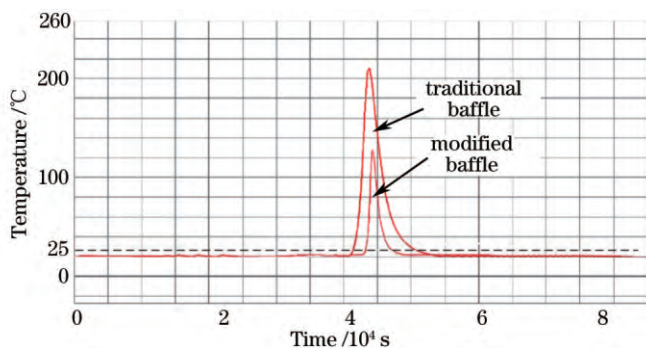


图6 极端高温瞬态工况下采用不同遮光罩时主镜温度变化
Fig.6 Temperature of two baffles in high temperature transient

4 热控设计及仿真分析

根据项目设计指标要求及环境边界条件,光学天线的温控设计以被动热控为主、主动热控为辅。被动热控措施主要包括多层隔热组件、隔热垫、热控涂层、热管、绝缘导热垫等。主动热控措施为主动加热器,由加热片和传感器构成闭环控温回路。根据轨道特点和热控设计方案,对采用改进型遮光罩的光学天线在极端低温瞬态工作工况、极端高温瞬态工作工况、高温太阳规避瞬态工况下天线光学元件的温度变化进行了仿真分析,如图7、8、9所示。

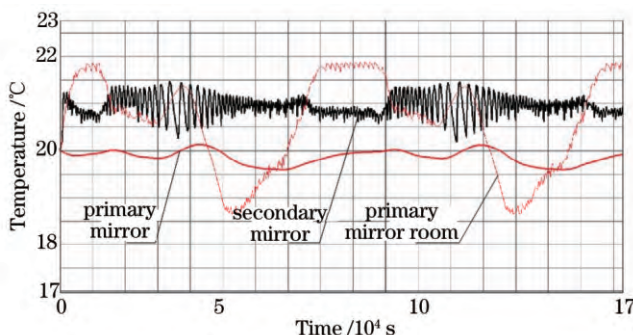


图7 极端低温瞬态工作状态天线温度变化

Fig.7 Temperature of optical antenna in low temperature transient

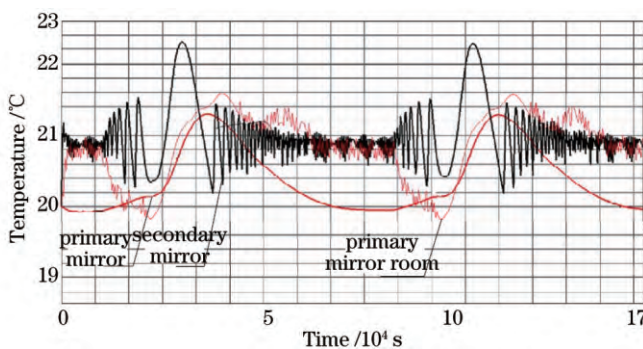


图8 极端高温瞬态工作状态天线温度变化

Fig.8 Temperature of optical antenna in high temperature transient

由图7~9分析表明,只要太阳光不直接照射到光学天线主镜,光学系统的温度均能满足要求,即只考虑太阳热效应时,太阳入射角大于 9.6° 时,系统均可进行通信。所以系统工作时设定规避角度为 9.6° ,当太阳入射角小于规避角,系统要采取规避措施,避免太阳直接照射系统主镜。

以 9.6° 为系统规避角,对GEO(77°E)对阿里站通信链路间的不可通时间进行分析,全年不可通时间如表2所示。分析表明全年只有2、3、9、10、11月系统需要规避阳光,全年需太阳规避天数为73天,占全年总天数的20%,不可通时间约为2620 min,可通率达到99.51%。

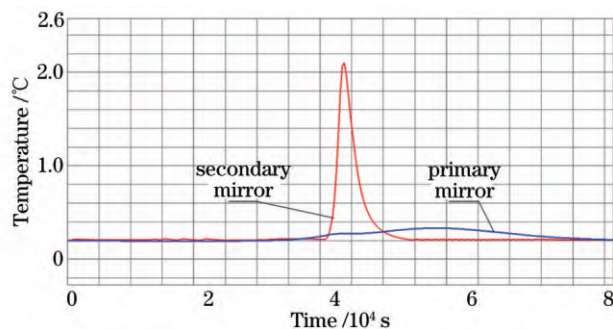


图9 高温太阳规避工作状态天线温度变化

Fig.9 Temperature of optical antenna in evading sun

表2 采用改进型遮光罩后系统太阳规避造成的全年不可通时间

Table 2 Unavailable time of the year for avoiding the sun with modified baffle

COM-link	Object	Result				
		Month	Unavailable day /days	Unavailable time /min	Available probability of the month /%	Max unavailable time /min
GEO (77°E) ——Ali evading angle 9.6	Unavailable time for avoiding the sun /min	2	18	970	97.6	110
		3	17	324	99.3	25
		9	6	40	99.9	10
		10	31	1266	97.1	70
		11	1	20	99.9	20
		Total	73	2620		
Available probability of the year			99.51%			

5 结 论

通过分析,采用改进型遮光罩后,系统的全年不可通时间约为 2620 min,全年主镜受太阳直接照射的天数共有 73 天,最长连续受照时间约为 110 min,系统全年可通率达到 99.51%。采用本文的改进型遮光罩后,GEO 对地激光通信系统虽然无法达到全天时通信,但是系统的可通时间改善明显,全年太阳规避造成的通信中断天数和时间大大减少,可通率大幅提高。因此,本文研究的改进型遮光罩对提升我国 GEO 对地激光通信系统的通信效能作用显著,为我国激光通信系统早日工程应用提供了支持和保障。

参 考 文 献

- 1 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Hou Peipei, et al.. Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120002.
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120002.
- 2 Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-679.
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): 670-679.
- 3 Li Rong, Shi Huli. Thermal effect analysis of main structure in space solar telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2425-2431.
李 蓉, 施许立. 空间太阳望远镜主光学望远镜热效应分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2425-2431.
- 4 Li Yun, Xiang Libin, Li Libo. Design and simulation of the baffle of a new type space camera [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(7): 41-44.
李 芸, 相里斌, 李立波. 一种新型空间相机遮光罩的设计与仿真[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 41-44.
- 5 Ye Rong, Yi Qiu, Kuang Dingbo, et al.. Effect of solar intrusion on scanning mirror of atmosphere vertical sounder onboard the FY-4 geostationary satellite[J]. J Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(5): 433-437.
叶 荣, 伊 球, 匡定波, 等. FY-4 大气垂直探测仪扫描镜的太阳入侵研究[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(5): 433-437.

- 6 Liu Yunhe, Liu Fenjing, Yu Longjiang. Sunlight invasion avoidance method of GEO optical remote sensing satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(6): 24-29.
刘云鹤, 刘凤晶, 于龙江. GEO光学遥感卫星阳光入侵规避方法[J]. 航天器工程, 2014, 23(6): 24-29.
- 7 Peter A Warren, Mark J Silver, Benjamin J Dobson. Lightweight optical barrel assembly structures for large deployable space telescopes[J]. SPIE, 2009, 7436: 74360B.
- 8 Hu Liang. Structural Design, Analysis and Simulation of a Deployable Sun Shield[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 6.
胡 亮. 空间可展遮光罩的结构设计、分析与仿真[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 6.
- 9 Jiang Fanming, Chen Fansheng. Deployable and rotatable baffle servo system for remote sensor in space[J]. Infrared Technology, 2012, 34(2): 73-77.
蒋范明, 陈凡胜. 地球同步轨道随动可展开异形遮光罩技术研究[J]. 红外技术, 2012, 34(2): 73-77.
- 10 Xu Quanchun, Yu Jianjie, Zhou Yanping, *et al.*. Decreasing earth background radiation in satellite-ground communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2300-2306.
婿全春, 余建杰, 周彦平, 等. 星地激光通信中地球背景辐射的抑制研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2300-2306.
- 11 Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, *et al.*. Research status and development trend of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 116-125.
付 强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116-125.

栏目编辑: 王晓琰