

多平台激光通信组网共焦点反射式光学天线设计

张涛^{1,2} 付强^{1,2*} 李亚红³ 姜会林^{1,2}

¹长春理工大学空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

²长春理工大学光信息传输与测控技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

³长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 目前国际上点对点激光通信技术已较为成熟,但多平台间组网通信问题仍未能解决。提出了一种新型组网通信光学天线设计方法,可实现多点间同步双工激光通信。分析了光学天线原理,并通过仿真建模验证了设计理论,给出了光学天线的结构设计和工作模式,最后采用数学最优控制算法推导出多组光学天线多平台动态、双工通信的工作范围,当旋转抛物面开口为300 mm时,能使方位角为360°,俯仰范围为90°以上。并针对GEO(高轨道卫星)—GEO—OGS(光学地面站)间的组网通信要求进行了光学天线的初始化设计,对推动激光通信技术实现大范围宽领域应用具有重要意义。

关键词 激光通信; 组网; 光学天线; 共焦点反射式

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022006

Design of Confocal Reflection Optical Antenna of Multi-Platform Network Laser Communication

Zhang Tao^{1,2} Fu Qiang^{1,2} Li Yahong³ Jiang Huilin^{1,2}

¹Defense Key Laboratory of Space to Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Key Laboratory of Optical Information Transmission and Control Technology, Changchun University of Science and Technology, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China

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

Abstract The point-to-point laser communication technology has been more mature. However, network communication problems among different platforms are still unable to be solved. A new design method of the optical antenna networking communication is put forward, which can achieve multi-point synchronous duplex laser communication. Firstly, the principle of optical antenna is analyzed and validated by modeling and simulation. Then, the structure design and the working mode of the optical antenna are presented. Finally, the working range for duplex communication and optical antenna multi-platform is analyzed through optimal control algorithm. Assumes the rotational parabolic aperture is 300 mm, this system can achieve 360° azimuth and over 90° elevation range. For network communication requirements of GEO (geosynchronous earth orbit)—GEO—OGS (optical ground station), the initial optical antenna is intended. It has an important meaning for promoting the laser communication application technology in a wide range of areas.

Key words laser communication; network; optical antenna; confocal reflection

OCIS coeds 220.2740; 140.3460; 200.2605; 060.1155

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 张涛(1980—),男,博士研究生,主要从事激光通信技术等方面的研究。E-mail: bexyqc@163.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光通信、光学总体设计等方面的研究。

E-mail: Hljiang@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: cust_fuqiang@163.com

1 引 言

和射频(RF)通信相比,激光通信具有信息量大、数据传输速率高、保密性好、抗干扰能力强等显著优势,能够实现对战场态势和自然灾害等情况进行“现场直播”式的侦查,因此无论对国防安全还是对国计民生均有着重要意义,是一种重要国家战略通信手段。

目前,激光通信技术历经40年快速发展已实现了大带宽、高速率的优越性能,其未来的目标就是要建立全部链路的高速信息网络,实现“高速实时动态通信”。美国、欧洲、日本、俄罗斯等国家均已提出了多平台间激光通信网络发展计划,旨在通过激光链路把各轨道卫星和空间站、飞机、浮空器、地面基站、舰船、汽车等组成空天陆海为一体的全方位激光通信网络^[1]。

空间激光通信组网的核心条件是实现每个节点对多个节点通信,并具备动态、双工通信能力。目前国际上发展成熟的各种激光通信系统一般仅能实现单平台点对点的通信,尚未全面解决多平台间组网通信存在的整体轻小型化、大动态通信范围、高能量利用率等问题,严重制约了激光通信技术的快速推广和大范围应用^[2-4]。因此提出一种可实现多点间较大通信范围同时实现激光通信的光学天线,可以满足天空地一体化组网通信的任务需求。

2 共焦点反射式激光通信组网天线设计

2.1 光学天线设计理论基础

旋转抛物面反射镜具有“当入射光线射向其焦点时在其外表面的反射光线与旋转轴平行”的光学性质,即无论光线从任何方向入射,只要射向旋转抛物面的焦点都将被反射为平行于旋转轴的出射光线。

因此若把旋转抛物面反射镜作为激光组网通信的光学天线,当某一通信平台从远处平行出射激光束至其外反射面时,射向其焦点的一条光线将被反射进入与其同轴的卡式中继光学系统中,最后到达 CCD、雪崩光电二极管(APD)等接收探测器^[5-7]。系统工作原理如图1所示。

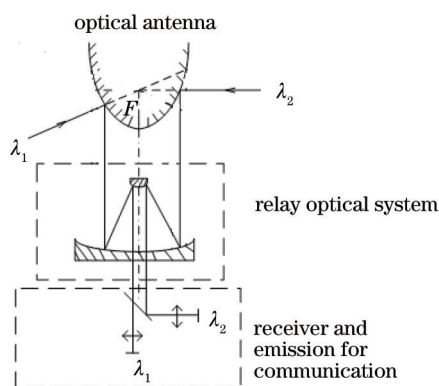


图1 一对多激光通信光学系统工作原理

Fig.1 Principle of one point-to multi-points laser communication optical system

但在上述通信情况下,一条光线的光能远不能满足系统探测阈值要求。因此考虑设计具有一定焦距的会聚透镜单元,使其焦点与旋转抛物反射面的焦点重合——即共用焦点。由透镜单元的孔径大小决定系统所接收和出射的激光束能量强弱。

2.2 原理仿真

将此设计的光学原理模型利用 LightTools 软件进行仿真分析,参数设置为:旋转抛物面方程 $x^2 + y^2 = 100z$, 共用焦点坐标为 (0,0,25), 4个会聚透镜单元口径均为 20 mm, 假设焦距分别为 $f_1 = 110$ mm, $f_2 = 120$ mm, $f_3 = 130$ mm, $f_4 = 140$ mm, 随机选择4个平行光束分别与水平面成 -10° 、 0° 、 0° 、 20° 夹角的不同方向入射,入射平行光束的能量均为 1 W, 根据蒙特卡罗算法(Monte Carlo)对1亿条光线进行光线追迹,即通过概率理论,把半球积分方程进行近似简化,使之可以通过相对重要的采样来模拟积分,最终得到仿真结果如图2、图3所示。

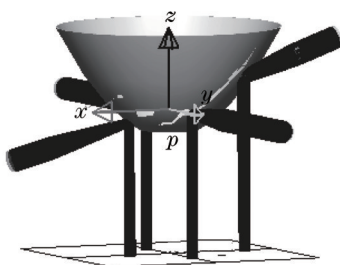


图2 共焦点反射式光学天线工作原理仿真

Fig.2 Simulation of confocal reflective optical antenna

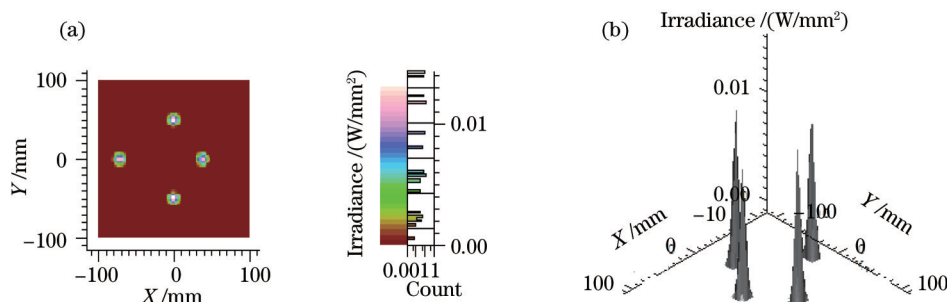


图3 像面 (a) 接收光斑和 (b) 接收能量

Fig.3 (a) Spot and (b) energy for image plane

从图3可以看到从不同方向入射的平行信号光束在水平接收面的不同位置上形成4个清晰的成像光斑,其能量与进入会聚透镜的能量相同,证明此设计的光学原理成立。

2.3 光学天线系统结构组成

根据上述原理设计的光学天线主要由旋转抛物面反射镜和会聚透镜组及相关精密控制结构、软件计算系统等部分组成。该系统以旋转抛物面镜为中心,多个不同焦距的会聚透镜环绕其周围并与其共用一个焦点,整体为共焦点反射式结构,可与激光通信光端机构成共轴系统,如图4所示。

会聚透镜组中每个透镜单元由圆柱形的中心轴支撑的多个悬臂梁分别实现角度的精密定位,该中心轴与旋转抛物面同轴,各个透镜单元能在精密控制系统的驱动下沿圆弧形轨道滑动实现俯仰角度的精确定位,整体可以实现在360°的方位角和较大的俯仰角所覆盖的经、纬积分球面上移动。因此该光学天线系统支持信号动态跟踪通信的能力。

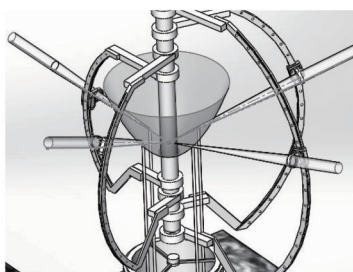


图4 多平台组网激光通信光学天线系统结构组成

Fig.4 Optical antenna structure of multi-platform network laser communication

2.4 光学天线系统工作原理

当激光通信平台的天线系统动态接收入射激光信号时,根据相关软件控制算法调整处于最佳条件下的透镜单元,使其光轴与信号光束入射方向平行,则入射光经过光学天线系统后形成平行光束出射至后续的卡式光学中继系统,再由后续系统对平行信号光进行分光、探测接收和解码等处理后形成有效信息。再由指向、捕获、跟踪(APT)系统实施持续的捕获、跟踪通信^[8-11]。

当天线系统发射激光信号时,根据光路可逆的原理,光源系统的出射平行光束将沿入射光路,经旋转抛物面反射镜和透镜单元实现平行出射。

该光学天线系统的每个透镜单元均可单独执行通信光束的动态发射、接收、捕获、跟踪等功能。因此，各类光学通信平台均可通过此系统实现与多方平台组网通信或者将该平台作为网络节点。

3 天线系统工作范围优化计算

根据共焦点反射式光学天线系统的结构设计可知,其动态搜索、跟踪、通信的方位角为 360° ,而俯仰角则需要根据实际总体需求进行优化设计。若不针对具体工作环境,建立整体工作范围最大化的模型如图5所示^[10-11]。 x 轴为旋转抛物面高度, y 轴为旋转抛物面的开口直径, $A(x_0, y_0)$ 和 $B(x_1, y_1)$ 分别为旋转抛物面的顶端和底端开口上的一点。

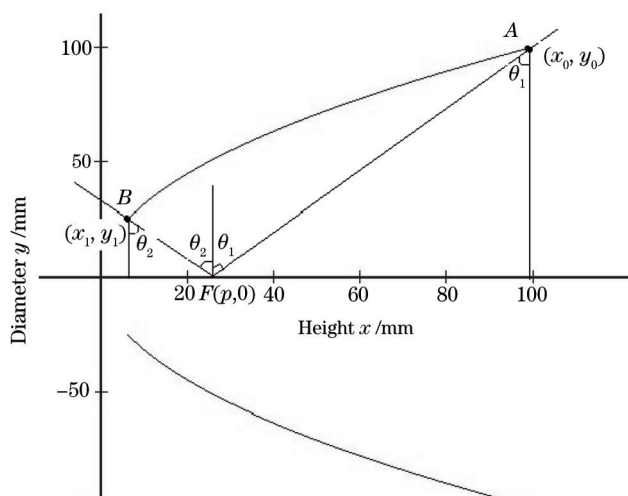


图5 动态搜索、跟踪、通信的俯仰角计算模型

Fig.5 Calculation model of dynamic search、tracking、pitch angle communication

根据图5所示计算天线系统动态跟踪、通信的俯仰角度 θ 为

$$\tan \theta_1 = \frac{x_0 - p}{y_0} \Rightarrow \theta_1 = \arctan \frac{\frac{1}{4p} y_0^2 - p}{y_0}, \quad \tan \theta_2 = \frac{p - x_1}{y_1} \Rightarrow \theta_2 = \arctan \frac{p - \frac{1}{4p} y_1^2}{y_1}, \quad (1)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \arctan \frac{\frac{1}{4p} y_0^2 - p}{y_0} + \arctan \frac{p - \frac{1}{4p} y_1^2}{y_1},$$

式中 y_0 为旋转抛物面顶端开口半径, y_1 为旋转抛物面底端开口半径。由(1)式可知,当总体设计指标确定了旋转抛物面上下开口半径大小时,即可通过最优控制算法解出系统通信俯仰角 θ 的最大值。

根据目前国际上成熟光端机系统的口径,假设旋转抛物面顶端开口直径为200 mm,考虑实际结构和装调需求,预留旋转抛物面底部开口直径为50 mm。在此条件下,经优化设计的俯仰角优化曲线如图6所示,从图像所示的优化结果可知,当焦点 $p=25$ 时系统拥有最大俯仰跟踪角度 73.74° 。

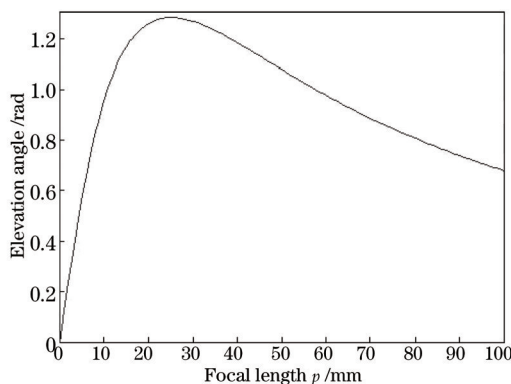


图6 旋转抛物面俯仰跟踪角度随焦距变化

Fig.6 Rotating parabolic pitch tracking angle variation with the focal length

其他条件下的最大跟踪俯仰角可以此类推,当上开口直径分别为 100、150、200、300 mm 时,光学天线经过优化设计可以达到的最大俯仰范围见表 1。

表 1 不同开口尺寸优化最大俯仰范围

Table 1 Different sizes optimize the maximum elevation range angle

Parameter	Value			
Aperture size for upper antenna /mm	100	150	200	300
Aperture size for lower antenna /mm	50	50	50	50
Focal value for point p	17.7	21.7	25	30.6
Maximum angle $l(^{\circ})$	40	60	73.7	91

该天线系统的捕获、跟踪俯仰角还可以根据不同激光通信平台的实际任务情况的需求,对抛物面的面型和焦点位置进行针对性的优化设计,分别计算出 θ_1 或 θ_2 的最大值,以达到适应不同平台的任务目的,这样的设计方案使系统组网通信的工作适应能力更强。

4 GEO(高轨道卫星)-OGS(光学地面站)之间组网通信天线初始化设计

假设 3 颗 GEO 卫星等距离处于 36000 km 轨道高度,地球的半径为 6400 km,其中 1 颗 GEO 卫星分别与另外 2 颗 GEO 卫星以及一处地面通信站进行通信,模型如图 7 所示。

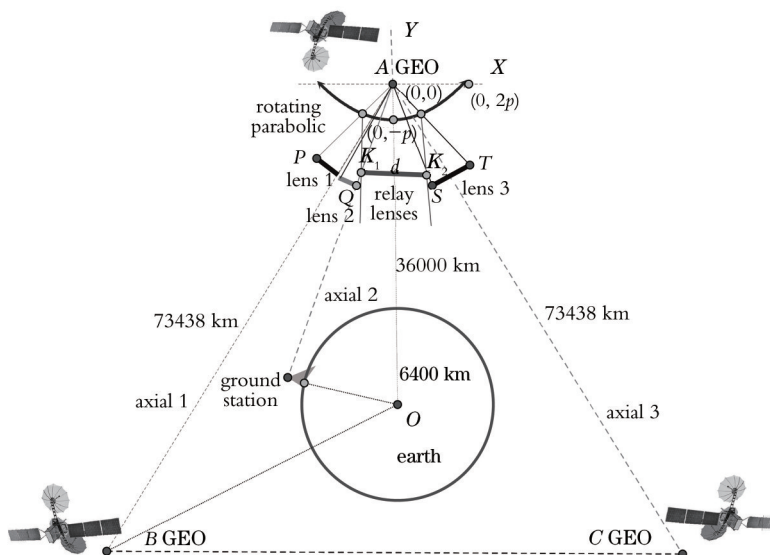


图 7 GEO 卫星、地面之间的组网通信模式

Fig.7 Network communication mode among GEO satellites and ground

这种情况下的组网激光通信所面临主要的问题是通信距离远、通信范围大。由于 GEO 卫星与地面通信站之间均为固定位置关系,因此无需进行精密动态跟踪控制系统,易于实现系统小型化、轻量化。在 A GEO 的天线与 C GEO 通信的一侧设置 1 个会聚透镜单元 lens 3,同时在与 B GEO、地面站通信的一侧设置 2 个会聚透镜单元 lens 1 和 lens 2,位置关系如图 7 所示。

4.1 会聚透镜单元的参数设计

假设通信发射波长为 1550 nm,功率为 5 W,通过对 A GEO 的发射信号光束整形使发射光束充满透镜单元口径出射,出射能量利用率达到 100%,相邻 2 个 GEO 在 73438 km 的通信距离下,根据相关条件下的通信链路能量利用率的保守计算公式 $\tau = \left(\frac{D_i}{\theta L}\right)^2$, θ 为通信光束发射角, D_i 为 i 个接收透镜单元的直径,且假设通信信号的发射效率和接收效率均为 50%,则可以得出 lens 2 口径为 150 mm,其余各平台的通信终端的口径均为 200 mm。

考虑系统小型化和便于加工装调,将 lens 1 和 lens 2 设计为半圆且保持接收入射光能的新透镜单元面积与原设计透镜单元的接收面积相同,设 r_1 为原透镜单元设计半径, R_1 为新透镜单元半径。即 $\pi r_1^2 = \frac{\pi}{2} R_1^2 \Rightarrow R_1 = \sqrt{2} r_1$, 同理可得 $R_2 = \sqrt{2} r_2$, 即 2 个新半圆透镜的半径分别为原设计透镜半径的 $\sqrt{2}$ 倍, lens 1 的圆心在光轴 1 上,其垂

直于光轴 1 与共用焦点 A 的距离为焦距 f_1 ; lens 2 的圆心在光轴 2 上,其垂直于光轴 2 与共用焦点 A 的距离为焦距 f_2 ,根据 lens 2 利用链路能量利用效率的设计原则,可同理求得 lens 1 和 lens 2 的焦距为 300 mm。

4.2 旋转抛物面的参数设计

根据图 7 可知,A GEO 与各个平台的通信光轴均处于旋转抛物面焦点以下 θ_2 工作范围,在 $x-y$ 平面上取旋转抛物面的焦点为坐标原点 $A(0,0)$,则天线的抛物线方程为 $x^2 = 4p(y+p)$,其开口直径为 $4p$, p 值将依据小型化、轻量化等设计要求待优化确定。

4.3 对中继光学系统的口径与位置确定

通过计算可得 B GEO 的会聚上边缘光线 AP 方程为 $y=x*\tan 34.764$,其与抛物线方程的交点 K_1 横坐标为 $x_1 = -1.04p$,设计对称光线 AT 与抛物线的交点 K_2 横坐标为 $x_2 = -1.04p$,考虑系统整体的小型化,该中继光学系统的最小光学口径为 $d = x_2 - x_1 = -2.08p$ 。当地面站位于光轴 2 与地球的切点时,经计算 lens 2 的下边缘光线 AQ 即光轴 2 的方程为 $y = x*\tan 81.32$,当 $x_1 = -1.04p$ 时中继光学系统的端点纵坐标为 $y = -6.81p$,另一端进行对称设计。同时考虑中继光学系统的开口不能对入射信号光线造成遮拦,因此其横坐标取值应满足:

$$1.04p \leq |x| \leq f \times \sin \left[\arcsin \left(\frac{6400}{6400 + 36000} \right) \right] = 45.28, p \in (0, 43.54], \quad (2)$$

因此中继系统的开口位置区间为

$$6.81p \leq |y| \leq f \times \cos \left[\arcsin \left(\frac{6400}{6400 + 36000} \right) \right] = 396.56 \text{ mm} .$$

根据以上初始化设计对光学天线进行了简单建模,如图 8 所示。

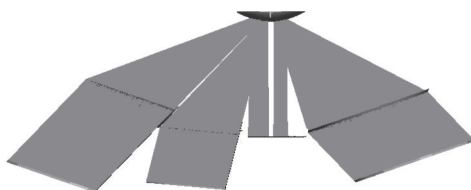


图 8 A GEO 的天线设计仿真示意图

Fig.8 Design and simulation of A GEO antenna

由以上初始化设计可以看出,设计过程较为简单、整个系统能够实现一对多通信的目标,设计弹性较大,易于实现轻量化和小型化的目标。

5 结 论

应用旋转抛物面的光学特性针对多平台激光通信组网系统设计了一种一对多通信光学天线系统。通过对天线系统进行建模仿真分析验证了设计理论的可行性,并利用数学模型对多个口径的旋转抛物面进行了俯仰角设计。针对 GEO、地面站之间的组网通信进行了天线系统的初始化设计,能较好地做到一对多通信和轻量化、小型化等各种指标要求。

整个天线系统便于实现更多平台通信节点组网通信,中空的结构易于实现整体轻量化,旋转体的大小和面型可以灵活设计使其更易实现小型化,为空间激光通信的组网提供了一种新途径,具有广泛重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林,胡 源,丁 莹,等.空间激光通信组网光学原理研究[J].光学学报,2012,32(10): 1006003.
- 2 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Cheng Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
马小平,孙建峰,程亚楠,等.DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J].光学学报,

- 2013, 33(7): 0706017.
- 3 Zhao Xin, Liu Yunqing, Tong Shoufeng. Line-of-sight alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese J Lasers[J], 2014, 41(5): 0505009.
赵 馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505009.
- 4 Kang Zijian, Han Xiyou, Li Cong, *et al.*. Analysis of the radio on free space optical transmission link for the satellite-to-ground communication[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1001004.
康子建, 韩秀友, 李 聪, 等. 星地微波光传输链路分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1001004.
- 5 Zhuang Qihui, Fu Xiuhua, Liu Guojun. Design and fabrication of a near-infrared dichroic beam splitter used for space laser communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831002.
庄秋慧, 付秀华, 刘国军. 用于空间激光通信系统的近红外分色片设计与研制[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831002.
- 6 Hurd W J. An introduction to very large arrays for the deep space network[C]. Conference of Space Mission Opretions and Ground Data Systems, 2002: 25-32.
- 7 Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.*. Lunar laser communication demonstration-experimental design and subsequent development [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.
宋婷婷, 马 晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证-实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040004.
- 8 Lou Yan, Zhao Yiwu, Chen Chunyi. Study on star-ground laser communication site selection and atmosphere affect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120602.
娄 岩, 赵义武, 陈纯毅. 星地链路激光通信地面站址选择及大气影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120602.
- 9 Li Yongjun, Zhao Shanghong, Zhang Dongmei, *et al.*. Networking technology of satellite laser communication platform[J]. Radio Communication, 2006, 10(4): 47-49.
李勇军, 赵尚弘, 张冬梅, 等. 空间编队卫星平台激光通信链路组网技术[J]. 无线电通信, 2006, 10(4): 47-49.
- 10 Strategic P. National Aeronautics and Space Administration Publication[M]. United States: Scientific and Technical Information, 2003: 295-298.
- 11 Weber W J, Cesarone R J, Abraham D S, *et al.*. Transforming the deep space network into the interplanetary network[J]. Acta Astronautica, 2006, 60(80): 411-421.

栏目编辑: 王晓琰