

一点对多点同时空间激光通信光学系统研究

江 伦^{1,2} 胡 源^{1,2} 王 超^{1,2} 安 岩^{1,2} 董科研^{1,2} 张立中^{1,2}

¹长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程中心, 吉林 长春 130022

摘要 随着空间激光通信技术的发展以及建立抗干扰高速天空地一体化信息网络的需要,研究空间激光通信组网技术迫在眉睫。在分析空间激光通信组网技术难点的基础上,提出了一种新的激光通信组网方案。利用广角扩束镜与双光楔组合作为多点激光通信系统的光学天线,广角扩束镜可实现对不同方位目标信号光的收集,双光楔组可实现对不同方位目标的同时动态跟踪。以此光学天线为基础,研究了可实现一对多同时空间激光通信的总体方案,设计了系统中的光学天线、中继光学分系统、收发分光分系统等。该方案可为空间激光通信组网提供一种新的技术途径。

关键词 光通信; 组网; 广角扩束镜; 双光楔组

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0506001

Optical System in One-Point to Multi-Point Simultaneous Space Laser Communications

Jiang Lun^{1,2} Hu Yuan^{1,2} Wang Chao^{1,2} An Yan^{1,2} Dong Keyan^{1,2} Zhang Lizhong^{1,2}

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract With the development of free space laser communication technology and the demand of anti-jamming, high-speed integrated information network, the research of high-rate laser communication networking technology is urgent. Based on the analysis of the technical difficulty in space laser communication networking, a new laser communication networking solution is proposed. Wide-angle beam expanders and double optical wedge groups are incorporated as antenna for the multi-point optical laser communication system. The wide-angle beam expander can collect the target signal lights in different directions, and the double optical wedge group can dynamically track different targets simultaneously. The overall scheme of multipoint free space laser communications based on this optical antenna is studied. The optical antenna, relay optical subsystem, transceiver subsystem and so on are designed. The scheme provides a new technical pathway for space laser communication network.

Key words optical communications; network; wide-angle beam expander; double optical wedge

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.1155

1 引 言

空间激光通信具有高速率、抗截获、抗干扰能力强和光端机型轻小等优点,欧洲各国、日本和美国等在空间激光通信领域已经开展了大量的研究工作,并开展了星间、星地、航空平台与卫星间、航空平台间的激光通信实验^[1-10]。目前该技术正处于向工程化应用发展的阶段,但由于激光通信光束束散角较小,通信形式只能为点对点,这在一定程度上制约了空间激光通信的广泛应用。如果能实现一点对多点激光通信,建立信息传

收稿日期: 2015-09-11; **收到修改稿日期:** 2015-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)、兵器预研支撑基金(62201070152)

作者简介: 江 伦(1984—),男,博士,讲师,主要从事光学系统设计、空间激光通信等方面的研究。

E-mail: jlciomp@163.com

输网络,空间激光通信在实际应用中则必将发挥更大的价值^[11]。如低轨侦察卫星将侦察信息快速传输至地面,需首先与高轨中继通信卫星进行激光通信,当多个低轨侦察卫星同时有数据传输需求时,要求中继通信卫星具有点对多点(即一对多)的同时激光通信能力;此外在编队飞行的卫星群内,卫星彼此之间需建立高效安全的激光通信链路;预警机与机群内飞机间也需一对多同时激光通信。因此如何实现一对多同时激光通信,具有重要的研究意义和价值。

美国于2001年提出了TSAT(Transformational Satellite Communication System)计划^[12],其中的激光通信即为点对多,预计通信速率为10~40 Gb/s。日本提出激光与微波通信相结合的双层低轨道(700 km和2000 km)全球通信组网方案,其上层采用激光通信,下层采用微波组网,但均未见一对多同时空间激光通信技术的具体报道。美国Clarke等^[13-14]提出一种高轨通信卫星与多个低轨用户星同时进行空间激光通信的方案,高轨激光通信载荷采用透射式镜头作为光学天线,视场可实现对低轨用户星全覆盖,通过在天线焦平面上移动探测器来实现与对应低轨用户星的通信,未见后续实验结果的报道。另外,Jiang等^[15-16]提出以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构作为光学天线的方案,并实现了室内一对二同时激光通信,通信速率达到2.5 Gb/s,通信范围方位为360°,俯仰角为38°。本文根据激光通信技术的发展现状与未来空间信息网络的发展趋势,提出了一种新的一点对多点的激光通信方案,以期能为激光通信组网的发展提供新的思路。

2 设计思想

2.1 光学天线设计原理

为实现一点对多点同时空间激光通信,要求激光通信端机具备同时对不同方位目标发射和接收信号光的能力,即需尽可能增大激光通信端机光学天线的视场角,因此采用广角镜头作为光学天线的基本结构形式。为方便对后续的多目标信号光进行分离、发射与接收,要求信号光经过上述光学天线后以平行光出射,因此将广角扩束镜作为系统的光学天线。扩束镜中前组物镜的后焦点与后组物镜的前焦点相重合,入射和出射光线均为平行光,其结构形式分为开普勒和伽利略两种类型,如图1、图2所示。

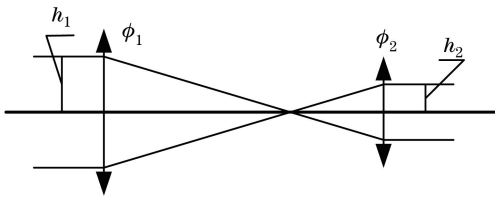


图1 开普勒扩束器

Fig. 1 Kepler beam expander

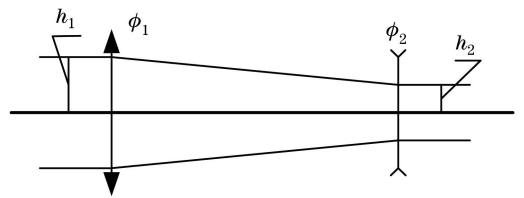


图2 伽利略扩束器

Fig. 2 Galileo beam expander

开普勒系统有中间像点,其轴外像差与轴上像差均能得到较好的校正;伽利略系统中间无中间像点,具有筒长短、系统成虚像的特点。为实现系统光学天线的小型化,选择伽利略型扩束镜。扩束镜由前组物镜和后组物镜构成,为无焦系统。需满足

$$\sum h\phi = h_1\phi_1 + h_2\phi_2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \beta, \quad (2)$$

$$\omega_2 = \beta\omega_1, \quad (3)$$

式中 h_1 为前组物镜的半口径, h_2 为后组物镜的半口径, ϕ_1 为前组物镜的光焦度, ϕ_2 为后组物镜的光焦度, β 为系统的放大倍率, ω_1 和 ω_2 分别为前组物镜和后组物镜的视场。

采用广角扩束镜作为系统的光学天线,其视场角较大,可实现对不同方位目标信号光的发射与接收。当广角扩束镜角放大倍率小于1时,伺服执行器可以用小角度跟踪大角度范围内的运动目标。

2.2 旋转双光楔跟踪原理

旋转双光楔由两个完全相同的折射楔形棱镜排列组成,工作时两棱镜分别绕共同的光轴独立旋转。其工作原理如图3所示。光束平行于系统旋转轴入射,改变两楔形棱镜的转角可使出射光束在一定转角范围

内实现任意指向。因此可采用旋转双光楔实现目标跟踪。其中单光楔的偏向角满足

$$\delta = (n - 1)\alpha, \quad (4)$$

式中 n 为光楔折射率, α 为光楔楔角。

对于双光楔组, 当两者主截面平行且摆放方向一致时, 其偏转光线的角度最大。当摆放方向相反时, 其偏转光线的角度为 0° 。

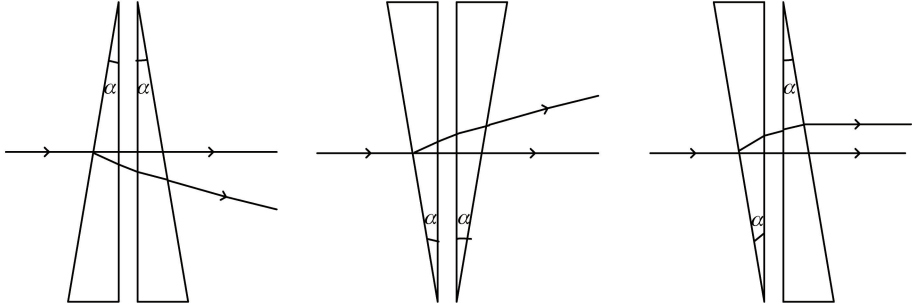


图 3 双光楔棱镜工作原理

Fig. 3 Operation principle of double optical wedge prisms

图 4 为双光楔棱镜偏折光线原理图, OQ 和 OP 分别为双光楔组中前光楔与后光楔的主轴, θ 、 β 分别为前、后光楔主截面与 x 轴方向的夹角, F_x 、 F_y 分别为前光楔造成的光束偏折角在 x 和 y 轴方向上的分量, B_x 、 B_y 分别为后光楔造成的光束偏折角在 x 和 y 轴方向上的分量。光线垂直入射经前光楔偏折后, 在 x 轴方向偏转角为 $\delta_{1x} = \tan \alpha \cos \theta$, 在 y 轴方向偏转角为 $\delta_{1y} = \tan \alpha \sin \theta$; 经过后光楔偏折后, 在 x 轴方向偏转角为 $\delta_{2x} = \tan \alpha \cos \beta$, 在 y 轴方向偏转角为 $\delta_{2y} = \tan \alpha \sin \beta$ 。

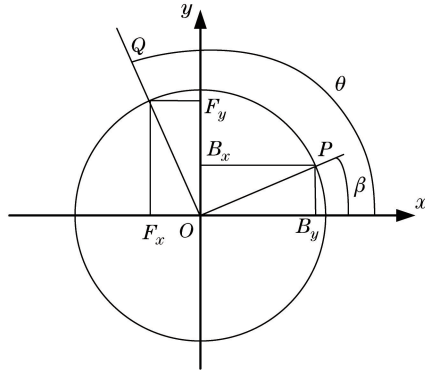


图 4 双光楔棱镜偏折光线原理图

Fig. 4 Schematic of refracting light through double optical wedge prisms

因此一束光线垂直入射双光楔组后, 在 x 、 y 方向上的光束偏折角度分别为

$$\delta_x = \tan \alpha \cos \theta + \tan \alpha \cos \beta, \quad (5)$$

$$\delta_y = \tan \alpha \sin \theta + \tan \alpha \sin \beta. \quad (6)$$

根据(5)式和(6)式可建立光线偏折角与光楔旋转角度之间的关系, 通过出射光束的偏折角解算出各光楔的转角, 即可实现对目标的指向与光学跟踪。

3 系统方案

3.1 系统总体方案

系统利用广角扩束镜具有的大视场特点及双光楔可对目标动态跟踪的特性, 将二者进行组合, 可实现一对多同时空间激光通信。系统中的光学天线采用广角扩束镜, 可接收来自不同方位通信目标发射的信号光, 同时向不同方位通信目标发射信号光。光学天线可接收、发射信号光, 但不能对运动的通信目标进行动态跟踪。为此, 需对光学天线结构加以改造, 在其出瞳处放置双光楔组。双光楔组中的每对双光楔均可实现对运

动目标的动态跟踪,多对双光楔可实现对多个目标的同时跟踪。此多点通信光端机由光学天线分系统、双光楔粗跟踪分系统、中继光学分系统和收发分光分系统组成,其总体结构如图 5 所示。

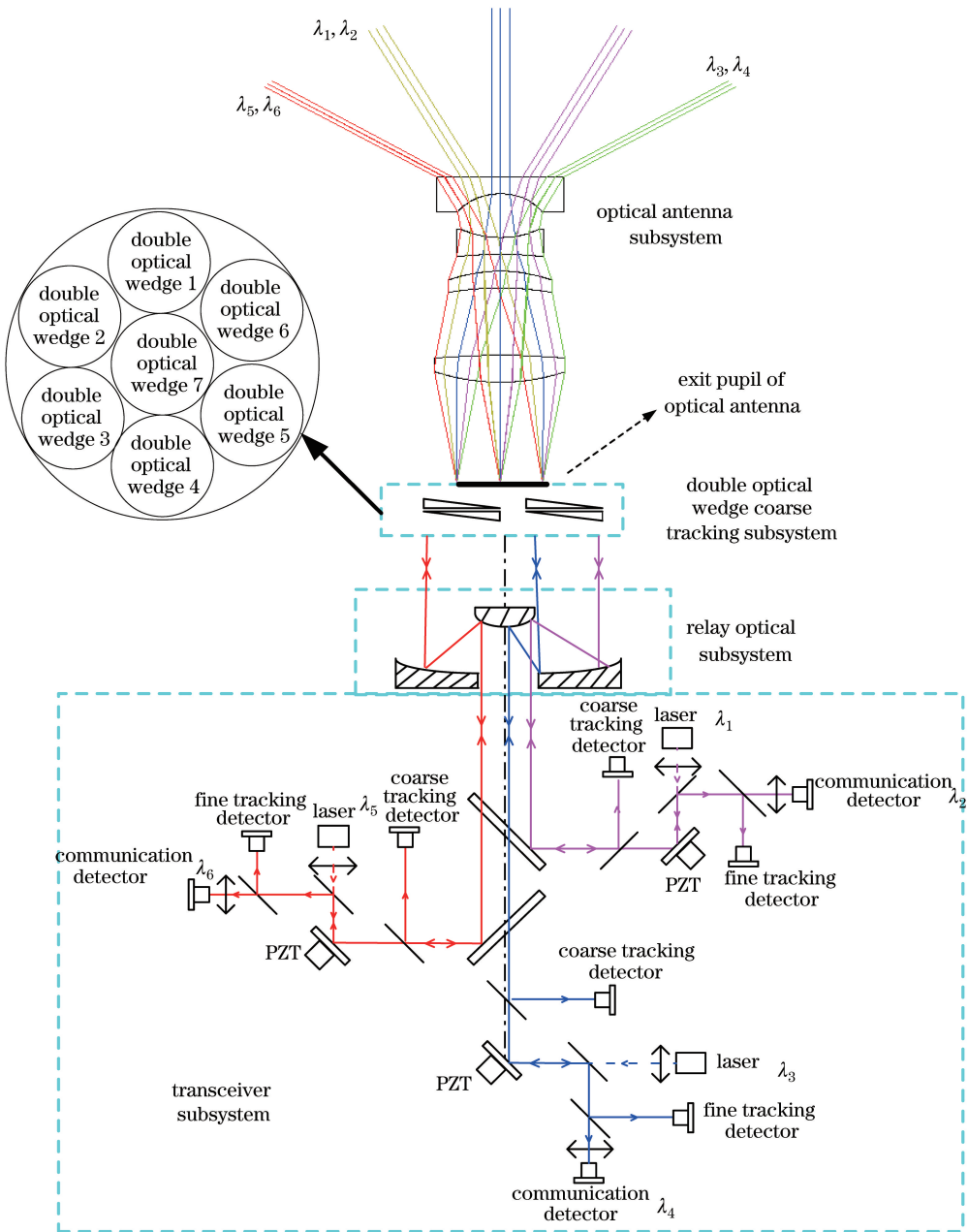


图 5 多点激光通信端机原理图

Fig. 5 Principle of multiple-point laser communication terminal system

3.2 光学系统方案

光学系统主要包括以下 4 个部分:

1) 收发光学天线:采用透射式广角扩束镜,接收不同方位通信目标发射的信号光,其工作范围较大,方位可达 360°,俯仰方向可覆盖 $-60^\circ \sim \pm 60^\circ$ 的角度范围。不同通信目标发射的信号光经过光学天线分系统后以平行光出射,各目标信号光出射方向不同,在天线出瞳处重叠。

2) 双光楔粗跟踪分系统:经光学天线分系统出瞳的信号光为平行光,且出射角度相对较小,约为十几度。即目标在方位 360°、俯仰角度为 $-60^\circ \sim \pm 60^\circ$ 的范围内运动,在广角扩束镜出瞳处,信号光光束角度在方位 360°、俯仰小角度范围内变化,在扩束镜出瞳处放置双光楔组,可实现对多个运动目标的同时动态粗跟踪。双光楔组由 N 对双光楔组成,每对双光楔实现对一个目标的跟踪,整个系统可同时实现对 N 个目标的

粗跟踪。粗跟踪稳定后,各目标信号光均平行于系统旋转轴向后续光学系统传输。

双光楔粗跟踪分系统需包含目标信号光角度探测子系统,可由零畸变广角相机来实现,广角相机探测器对所有目标信号光均能响应,并可根据光斑位置确定信号光入射角度,然后向双光楔发出驱动指令使其偏转合适角度,使目标信号光经双光楔偏折后平行于系统旋转轴出射。根据光斑个数确定通信目标个数,为各双光楔组分配粗跟踪任务,以便尽可能提高系统光能利用率。

3) 中继光学分系统:经过光学天线分系统和双光楔粗跟踪分系统后的光束口径较大,导致后续的分光元件和通信收发光学系统的设计与加工难度大,需利用中继光学分系统将通信信号光进行缩束,以利于后续收发分光分系统工作。

4) 收发分光分系统:采用双色分光片实现不同目标信号光之间的有效隔离和同一目标发射信号光与接收信号光的隔离。该分系统中的粗跟踪相机为双光楔提供脱靶量信息,以实现粗跟踪闭环;精跟踪相机为压电陶瓷(PZT)振镜提供脱靶量信息,实现精跟踪闭环,对目标实现稳定精跟踪。

3.3 捕获、对准和跟踪的实现及通信收发

系统建立通信链路时,需通过全球定位系统(GPS)与星历表等确定主光端机与从通信目标之间的相对位置,根据通信目标个数规划双光楔跟踪方案,确定各双光楔跟踪的通信目标,控制双光楔组的旋转角度以保证跟踪精度。然后通过信标光进行捕获、对准和跟踪(APT);待跟踪稳定后进行通信。通信发射时,针对不同的通信目标,采用不同的通信波长,信号光经准直后以平行光出射,然后经过中继光学系统和双光楔组后由广角扩束镜发射。通信接收时,不同目标发射的信号光,经过广角扩束镜、双光楔组后平行于系统旋转轴进入中继光学系统,由中继光学系统缩束,然后由分光片进行分光,由不同探测器分别探测接收,从而实现多点通信。

4 应用可行性分析

根据上述设计方案,针对低轨卫星星座间激光通信组网系统进行了初步的设计,如图6所示。假设低轨卫星星座内包含4颗卫星,主星可同时与3颗辅星通信,根据轨道特性计算得到主星通信范围为方位 360° 、俯仰范围为 $-60^\circ\sim 60^\circ$,通信距离为400 km,通信速率为2.5 Gb/s,误码率小于 10^{-7} 。

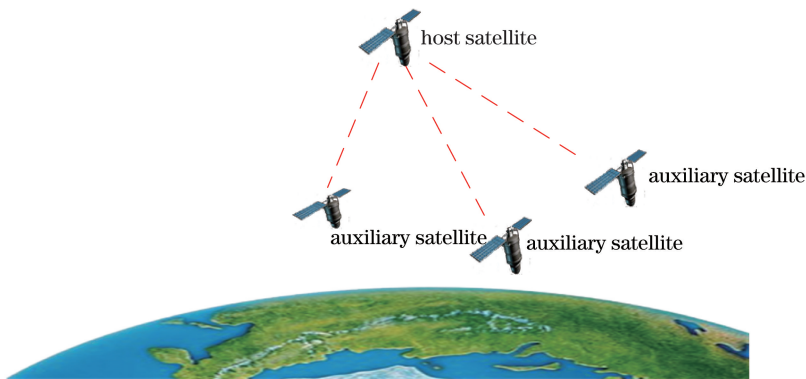


图6 一对三激光通信应用场景图

Fig. 6 Application scene of one-to-three laser communication

根据上述应用要求,对光学天线进行光机结构设计,如图7所示。最终设计的广角扩束镜口径为350 mm,视场角范围为 $-60^\circ\sim 60^\circ$,入瞳口径为50 mm,系统放大倍率为0.21,出瞳口径为237 mm,光楔楔角为 10° 。光学天线具备对方位 360° 、俯仰角度为 $-60^\circ\sim 60^\circ$ 范围内的通信目标进行动态跟踪的能力。单个光楔口径为100 mm,安装在广角扩束镜的出瞳位置,每对双光楔具有独立机械支撑与驱动机构,彼此之间不会相互干扰。双光楔光机结构图如图8所示。

对系统通信链路进行分析。通信激光器发射功率为2 W,光学系统透射率为0.9,发射口径为50 mm,以近衍射极限角 $100\ \mu\text{rad}$ 束散角发射,链路距离为400 km,辅星光端机接收口径为150 mm,接收光学系统透射率为0.7。链路功率计算相关参数如表1所示,表1中APD为雪崩光电二极管。表1中广角扩束镜发

射损耗 $\eta_1 = 20 \lg(D_2/D_1)$, 空间损耗 $\eta_2 = 20 \lg\left(\frac{\phi}{L} \times \theta\right)$ 。

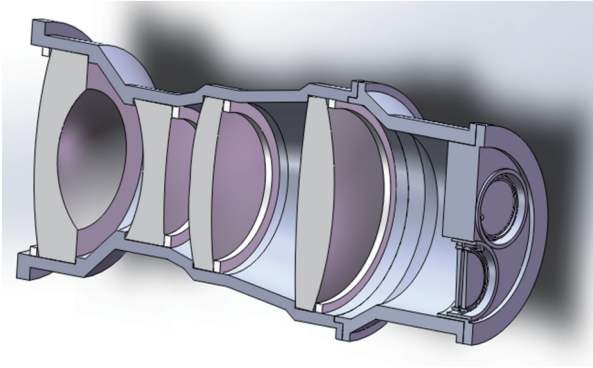


图 7 光学天线光机结构图

Fig. 7 Structure diagram of optical antenna

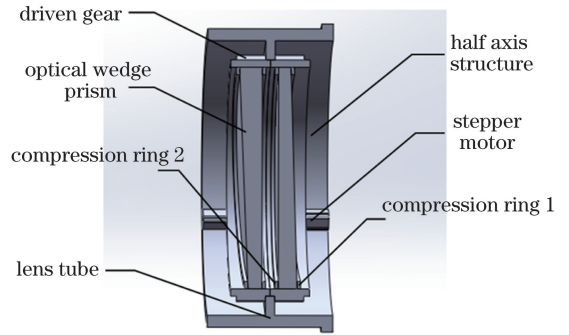


图 8 双光楔光机结构图

Fig. 8 Structure diagram of double optical wedge

表 1 系统激光通信链路功率计算相关参数

Table 1 Calculation parameters of system laser communication link power

| Parameter | Link gain /attenuation | Remark |
|---|------------------------|--|
| Power of communication laser | 33 dBm | 2 W |
| Optical system transmittance | -0.45 dB | System transmittance is 0.9 |
| Emission loss of beam expander η_1 | -7.64 dB | $D_1 = 237 \text{ mm}, D_2 = 100 \text{ mm}$ |
| Space loss η_2 | -48.5 dB | Link distance $L = 400 \text{ km}$, beam divergence angle $\theta = 100 \mu\text{rad}$, receiving diameter $\phi = 150 \text{ mm}$ |
| Loss at receiving optical path | -1.5 dB | System transmittance is 0.7 |
| Receiving power at APD | -25.09 dBm | |
| Detecting sensitivity of APD | -30 dBm | At bit error rate of 10^{-7} and 2.5 Gb/s |
| Power margin | 4.91 dB | |

计算结果表明,该方案具备低轨星座内一对三同时激光通信的能力,可实现通信距离为 400 km、通信速率为 2.5 Gb/s、误码率小于 10^{-7} 的通信技术指标。

5 结 论

提出了一种新的一点对多点同时空间激光通信的光学总体方案,即采用广角扩束镜与双光楔棱镜组相结合作为系统的光学天线,以实现多个目标的动态跟踪与信号接收。利用中继光学分系统实现多个信号光的缩束,利用收发光学分系统实现系统信标光收发、通信光收发的分离。针对不同的应用场景,该系统可根据目标数量与位置分布,对双光楔组进行灵活控制,尽可能提高光能利用率。经过设计分析,该方案具备低轨星座内一对三同时激光通信的能力,可实现通信距离为 400 km、通信速率为 2.5 Gb/s、误码率小于 10^{-7} 的通信技术指标。此外,该系统还可用于飞机群内、炮兵阵地间的激光通信组网,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Cornwell D M. NASA's optical communications program for 2015 and beyond[C]. SPIE, 2015, 9354: 93540E.
- 2 Rose T S, Janson S W, LaLumondiere S, *et al.*. LEO to ground optical communications from a small satellite platform [C]. SPIE, 2015, 9354: 93540I.
- 3 Sodnik Z, Lutz H, Furch B, *et al.*. Optical satellite communications in Europe[C]. SPIE, 2010, 7587: 758705.
- 4 Smutny B, Kaempfer H, Muehlnikel G, *et al.*. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[C]. SPIE, 2009, 7199: 719906.
- 5 Giggenbach G, Horwath J, Knapek M. Optical data downlinks from earth observation platforms[C]. SPIE, 2009, 7199: 719903.
- 6 Yamakawa S, Hanada T, Kohata H, *et al.*. JAXA's efforts toward next generation space data-relay satellite using optical

- inter-orbit communication technology[C]. SPIE, 2010, 7587: 75870P.
- 7 Alonso A, Reyes M, Sodnik Z. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station[C]. SPIE, 2004, 5572: 372-383.
- 8 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 1-18.
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 1-18.
- 9 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(2): 147-155.
刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 147-155.
- 10 Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.*. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵 馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- 11 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser 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.
- 12 Yin Zhizhong, Chen Jingyi, Zhou Xianwei. Development and technology of U.S. military satellite communications system [J]. Communications Technology, 2009, 42(11): 55-58.
尹志忠, 陈静毅, 周贤伟. 美军卫星通信系统的发展及其技术研究[J]. 通信技术, 2009, 42(11): 55-58.
- 13 Clarke E S, Prenger R, Ross M. Experimental results with a prototype three-channel multi-access transceiver lasercom terminal[C]. SPIE, 1993, 1866: 128-137.
- 14 Fox N, Maynard W, Clarke E, *et al.*. GSFC conceptual design study for an inter-satellite optical multiple access communication system[C]. SPIE, 1991, 1417: 452-463.
- 15 Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.*. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江 伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- 16 Jiang Huilin, Hu Yuan, Song Yansong, *et al.*. Research on space laser communication network[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(5): 52-59.
姜会林, 胡 源, 宋延嵩, 等. 空间激光通信组网光端机技术研究[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 52-59.