

空间激光通信组网光学原理研究

姜会林 胡源* 丁莹 付强 赵义武 董科研 宋延嵩 娄岩

(长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 随着高分辨率观测技术的发展和大数据率信息传输的迫切需求,研究高速率激光通信的组网技术迫在眉睫。分析了空间激光通信链路组网所需要满足的基本要求及其实现中必须解决的技术难点,提出了组网光学原理,同时研究了一种可用于多目标间同时进行激光通信的技术方案,设计了以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构的光学天线、中继光学系统以及发射接收与捕获、跟踪和对准(APT)系统,为空间激光通信链路组网提供了新的技术途径。

关键词 光通信;组网光学原理;光学系统天线;旋转抛物面

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1006003

Optical Principle Research of Space Laser Communication Network

Jiang Huilin Hu Yuan Ding Ying Fu Qiang Zhao Yiwu

Dong Keyan Song Yansong Lou Yan

(Space Photoelectric Technology Institute, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract With urgent demand of the high-resolution observation technology development and the high data rate transmission of information, the research of high-rate laser communication networking technology is imminent. Basic requirement and technical difficulties on the space laser communication networking in realization are analyzed. The new networking optical principle is proposed. A technological solution is studied, which can be used for laser communication through multiple targets at the same time, and an optical antenna of multi-mirror combination is designed based on the paraboloid of revolution, relay optical system, receiving and transmission system and acquisition, pointing, tracking (APT) system. It provides a new technical way for space laser communication network.

Key words optical communications; network optical principle; optical system antenna; paraboloid of revolution

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.1155

1 引言

目前,空间激光通信技术研究基本上都是点对点形式的^[1~4],然而从应用的角度看,如果实现多点间的空间激光通信,建立起信息传输网络,具有更大的实用价值。近年国际上已经开展相关研究,如美国计划在 2016 年实施“转型卫星通信系统(TSAT)”全球通信组网计划的构想,拟采用微波通信与激光通信相结合的方式^[5];德国计划建立以 GEO 为中继,与 LEO、地面站和高空探测器等之间的激光通信链路^[6];日本提出激光与微波通信相结

合的双层低轨道全球通信组网方案^[7]等,但国际上至今还未见激光通信组网的成功应用报道。国内对激光链路组网的研究还处于起步阶段,主要集中在总体设想及网络协议等方面^[8~13],针对具体激光通信组网系统的深入研究也未见报道。

空间激光通信组网的主要难点是由于远距离、高速率、保密安全通信的要求,使得通信用光端机的发射束散角和接收视场角都很小,因此必须提出新的光学原理,才能实现多点间激光通信。本文鉴于当前国内外开展空间激光通信及组网研究的形势和

收稿日期: 2012-04-09; **收到修改稿日期**: 2012-05-08

作者简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统总体设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。E-mail: hljiang@cust.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: huy@cust.edu.cn

未来发展趋势,对空间激光通信组网原理和方案进行探讨,希望能提供一种有价值的技术途径。

2 组网光学原理

2.1 光学天线与性能

为了实现多目标同时通信,需要尽量增大光学天线的可视范围,可采用抛物面、椭球面、双曲面或者其他形式的自由曲面作为光学天线。分析了多种曲面形式的光学性质之后,本文以旋转抛物面为例进行讨论。

如图 1 所示,假设抛物线方程为 $y^2 = 4px$, $P(x_0, y_0)$ 为抛物线上一点,则 $y_0^2 = 4px_0$ 。过点 P 的切线为

$$L: y_0 y = 2p(x + x_0) \Rightarrow 2px - y_0 y + 2px_0 = 0. \quad (1)$$

直线 PF (F 为焦点) 的方程为

$$y = \frac{y_0}{x_0 - p}(x - p) \Rightarrow y_0 x - (x_0 - p)y - py_0 = 0. \quad (2)$$

抛物线的对称轴方程为 $y=0$ 。

设切线 L 与直线 PF 的锐夹角为 θ_1 , 切线 L 与对称轴的锐夹角为 θ_2 , 计算可得

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{|2py_0 + (x_0 - p)y_0|}{\sqrt{4p^2 + y_0^2} \sqrt{y_0^2 + (x_0 - p)^2}} = \\ &= \frac{|x_0 y_0 + py_0|}{\sqrt{4p^2 + 4px_0} \sqrt{4px_0 + x_0^2 - 2px_0 + p^2}} = \\ &= \frac{|y_0|}{\sqrt{4p(p + x_0)}}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{|-y_0|}{\sqrt{4p^2 + y_0^2}} = \frac{|-y_0|}{\sqrt{4p^2 + 4px_0}} = \\ &= \frac{|y_0|}{\sqrt{4p(p + x_0)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \cos \theta_1 = \cos \theta_2. \quad (5)$$

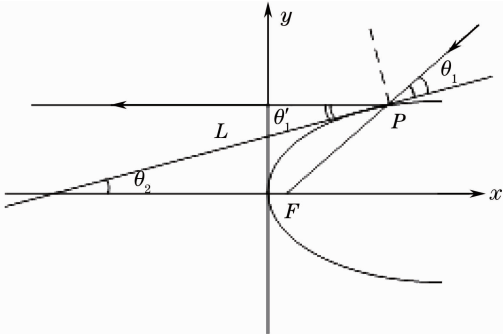


图 1 抛物线光学原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parabola optical principle

式中 θ_1, θ_2 均为锐角, 所以 $\theta_1 = \theta_2$ 。由于 L 为切线并根据反射定律可知 $\theta'_1 = \theta_1$, 因此 $\theta'_1 = \theta_2$ 。

根据上述证明可知: 旋转抛物面具有入射光线通过焦点时, 反射光线与旋转对称轴平行的光学性质。由此可以考虑, 若把旋转抛物面(改造后)作为空间激光通信的一个终端光学天线, 则可以实现一对多点通信, 进而实现激光通信链路组网。

2.2 光能利用率

若采用旋转抛物面作为光学天线, 任何方向发来的通信光束(近似被看为平行光), 都会有一条光束的方向通过抛物面的焦点, 可以平行于对称轴反射并进入后续系统中。但其他光束, 因不通过焦点而不具有这样的性质。于是就存在一个问题, 若旋转抛物面不经过改造, 则其通信光能利用率就太低了(因为只有少数光束能进入后续系统中)。

为了提高天线的光能利用率, 提出把抛物面改造成为以旋转抛物面为基底的多镜片拼接结构, 如图 2 所示。

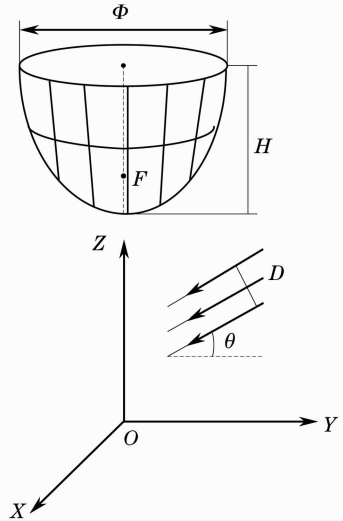


图 2 光学天线结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical antenna structure

假设入射到光学天线的通信光束口径为 D , 若与 XOY 面夹角为 θ , 该光束在 XOZ 面上投影为 S_1 , 则近似有

$$S_1 \approx \frac{\pi[D/\sin(\pi/2 - \theta)]D}{4} = \frac{\pi D^2}{4 \cos \theta}. \quad (6)$$

如果改造后的旋转抛物面在通信中利用的镜片面积为 S_2 , 则通信光能利用率 η 可表示为

$$\eta = \frac{S_2}{S_1}. \quad (7)$$

如图 2 所示, 设旋转抛物面的口径为 $\phi=200$ mm, 上下两层镜片, 每层每周镜片数为 N , 取 $N=9$, 则每

两块镜片间夹角 $\alpha = \frac{360^\circ}{N} = 40^\circ$ 。现取上层结构进行计算。旋转抛物面上端周长 $L = 2\pi R = 628 \text{ mm}$ ，考虑到每块镜片近似为梯形，取其腰的宽度为上端的 0.85 倍。

再取抛物面的高度 $H = \phi = 200 \text{ mm}$ ，去掉其底部通信盲区后，近似有 $H^* = 0.9H = 180 \text{ mm}$ ，则每层高度 $h = 90 \text{ mm}$ ，所以每块镜片面积为

$$S_2 = \frac{L}{N} \times 0.85 \times h \approx 5300 \text{ mm}^2. \quad (8)$$

而入射光全口径面积在取 $D = \phi = 200 \text{ mm}$ ， $\theta \leq 30^\circ$ 的情况下，根据(6)式计算可知 $S_1 \approx 35000 \text{ mm}^2$ ，所以一块镜片的光能利用率为

$$\eta = \frac{S_2}{S_1} \approx 15\%. \quad (9)$$

在系统设计时，应考虑用主反射镜片的相邻镜片“协助”的办法。假设有一块相邻镜片“协助”，则光能利用率可达到 30%。其中“协助”镜片的工作原理如图 3 所示。

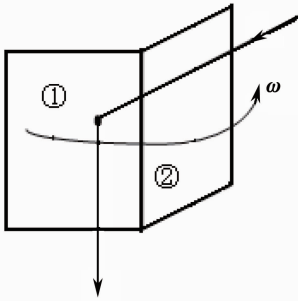


图 3 “协助”镜片工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of “help” mirror work principle

1) 假设入射光束方向不变，上图中①为主反射镜片，②为“协助”镜片，当光线入射面与①面垂直时，②应右转 40° ，使二镜片平行，以起到“协助”反射作用。

2) 当入射光束(某卫星飞行带动)以 ω 的方向与速度转动时，如果在水平方向上转角为 β ，则镜片①随着转 β 角，镜片②向左回转 β 角。

3) 当入射光束在垂直方向上转角为 γ ，则镜片①和②在垂直方向上同向旋转 $\gamma/2$ 。如果入射光束在其他方向转动，则用矢量法合成即可计算镜片①和②的转角。

3 方 案

3.1 系统总体方案

旋转抛物面的上述光学性质恰能破解空间激光通信组网中多点同时通信的难题，该结构的光学天

线可以同时接收不同轨道、不同方位空间光端机发射来的激光束，也可以同时发出适用于不同轨道、不同方位空间光端机接收的激光束。由于抛物面上总存在一点是由射向焦点的光线与抛物面相交形成的，且该点具有唯一性，只有该点的反射光线平行于对称轴出射，难以满足通信系统对接收光能量的要求。为此，对该抛物面结构进行了改造，将该点扩大成一个镜面，利用多个镜面片拼接出一个旋转抛物面形状，即设计了一种基于旋转抛物面的多反射镜拼接结构的多点激光通信天线。其通信光端机系统总体结构如下图 4 所示。

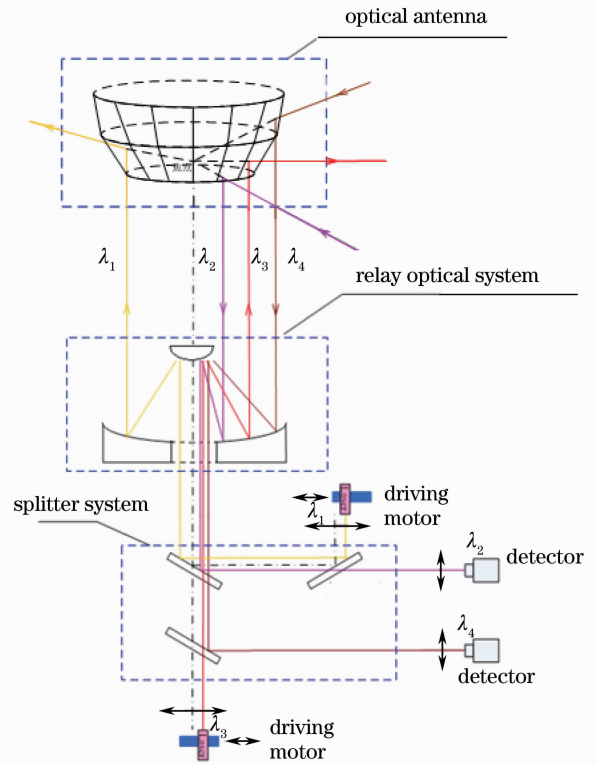


图 4 多点激光通信光端机系统原理图

Fig. 4 Diagram of multiple-targets laser communication terminal system principle

如图 4 所示，多点激光通信光端机由光学系统、发射接收与捕获、跟踪和对准(APT)系统构成。其中光学系统由收发光学天线、中继光学系统和分光系统组成；发射接收与 APT 系统由通信发射组件、通信接收组件和 APT 组件组成。

3.2 光学系统

1) 收发光学天线：设计成为以抛物面为基底多个反射镜拼接的形式。每块反射镜的法线均垂直于抛物面的切线，根据多点通信的轨道位置及数量，对拼接反射镜的尺寸、外形、数量以及拼接方式进行优

化设计。每块镜片通过控制可进行水平、俯仰方向上的运动,使得该天线同时具有一定的光线稳定及偏折功能。通过该收发光学天线能够实现同一时间、水平 360°全周、俯仰方向大视场的针对不同方位目标的通信。

2) 中继光学系统:由于基于旋转抛物面多反射镜拼接的光学天线出射的光束口径较大,后续的分光元件工艺上难以实现该尺寸,因此需设计中继光学系统。拟采用反射式结构,可以有效地避免多个工作波段引起的色差。该中继系统采用卡塞格林结构,主镜为抛物面,次镜为双曲面,易于实现很高的光学质量,同时有效地减小体积。卡塞格林系统有中心遮拦,但是收发光学天线中心也有部分盲区,设计时需考虑匹配,减小能量损耗。

3) 分光系统:采用高效的分光片,将多个波长的收发组件整合到同一口径发射与接收,有利于装置的小型化和轻量化。

3.3 发射接收与 APT 系统

1) 通信发射组件:针对不同的通信波长,采用多个通信激光器,每个激光器经光纤耦合并准直后出射,出射端通过压电陶瓷(PZT)控制,在发射光学系统焦面位置进行移动,实现发射视场的选择。

2) 通信接收组件:采用多个探测器,对不同轨道的信号光分别进行接收。以接收两路、发射两路为例,如图 4 所示,不同轨道来的信号光,波长分别为 λ_2 和 λ_1 ,经过以抛物面为基底多反射镜拼接的光学天线后,均以平行光出射,经过中继光学系统缩小了口径,然后经过分光系统被分成不同光路,分别探测接收,从而完成多点通信接收。

3) APT 组件:即捕获、对准和跟踪分系统。在空间激光通信过程中,首先,借助于 GPS、星历表等手段测量出光端机所在空间坐标;然后,利用信标光进行捕获、对准和跟踪;在稳定跟踪的情况下开始通信^[14]。

光学天线由多片反射镜拼接而成,APT 组件在获得通信方相对位置后,优化选取和快速计算出所需反射镜的片数以及每片反射镜调整的角度,统一控制并完成反射镜的转动,以保证必须的跟踪精度和接收能量的最大化,为可靠通信奠定基础。

4 结 论

提出了一种星群间激光通信组网的光学原理和总体方案,即以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构作为收发共用天线;以卡塞格林光学系统作为

中继;以复杂分光系统集成发射、接收与 APT 组件;针对通信组网的特殊要求,采用视场选择实现一对多点的通信发射。该方案可进行多颗卫星间同时双工通信,而且有利于系统小型化,为空间激光通信组网提供了新途径,具有重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 649~654
佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 649~654
- 2 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
- 3 Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011. 9~22
姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2011. 9~22
- 4 Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, **34**(8): 39~42
刘宏展,孙建锋,刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *光通信技术*, 2010, **34**(8): 39~42
- 5 Yin Zhizhong, Chen Jingyi, Zhou Xianwei. Development and technology of U. S. military satellite communications systems[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
- 6 Berry Smutny. The overview report of coherent laser communication [C]. Coherent Laser Communication Conference, 2007. 6
- 7 中国激光网. 自由光通信技简介 [OL]. <http://info.laser.hc360.com/2005/09/16095820763.shtml>, 2005
- 8 Luo Pengfang. Research on Dynamic Routing Strategy and Algorithm in LEO Satellite Networks with Laser LSLs [D]. 哈尔滨: Harbin Institute of Technology, 2007
罗鹏芳. 低轨道卫星激光通信网络动态路由策略与算法研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2007
- 9 Zhang Cheng, Gu Wenbo, Liu Di *et al.*. A pilot study of point-to-multipoint for satellite-to-earth optical communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 275~278
张诚,顾闻博,柳迪等. 星地光通信多点地面接收方案的初步研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 275~278
- 10 Hu Hefei, Liu Yuanan. Application of high data-rate space laser communication system in aerospace information networks [J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(6): 1270~1274
胡鹤飞,刘元安. 高速空间激光通信系统在空天信息网中的应用[J]. *应用光学*, 2011, **32**(6): 1270~1274
- 11 Liang Ping, Zhao Shanghong, Li Yongjun *et al.*. The satellite optical network routing algorithm [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, (5): 54~57
梁平,赵尚弘,李勇军等. 基于激光链路的卫星光网络路由算法[J]. *光通信技术*, 2007, (5): 54~57
- 12 Chen Jing, Ai Yong, Tan Ying. Optical communication system design of formation flying micro-satellites [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, **32**(6): 41~43
陈晶,艾勇,谭莹等. 小卫星编队光通信系统设计[J]. *光通信技术*, 2007, **32**(6): 41~43
- 13 Wu Guoqiang, Sun Zhaowei, Zhao Dan *et al.*. Development and

trend research of inter-satellite communication system on formation small satellites [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, **39**(11): 1700~1703

吴国强, 孙兆伟, 赵丹等. 编队小卫星间通信系统的发展和趋势 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(11): 1700~1703

14 Han Cheng, Bai Baoxing, Zhao Xin *et al.*. Acquisition control

system of free space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 91~95

韩成, 白宝兴, 赵馨等. 自由空间激光通信捕获控制系统 [J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(1): 91~95

栏目编辑: 李文喆