

多点激光通信光学中继天线伺服系统

于笑楠 佟首峰 姜会林 张立中 董 岩 白杨杨

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

摘要 一对多激光通信网络通过基于旋转抛物面原理的伺服摆镜天线,对多点光端机的激光信号进行捕获、跟踪、通信,形成空间激光通信网络。论述了该伺服天线系统的基本原理、架构、跟踪算法与拼接技术,证明了旋转抛物面天线的形成原理,给出了伺服摆镜天线的可行性分析。介绍了跟踪系统的闭环架构,分别阐述了敏感器、执行器、控制器的组成及指标。给出用于光斑跟踪的带执行器限位的比例积分微分(PID)算法及调试方法。为了实现连续跟踪,引入多反射镜拼接技术,着重说明了反射镜拼接的实现方法。整个伺服天线系统以执行范围、跟踪精度、拼接可靠性为测试内容,最终实现了360°全向执行,小于50 μrad 跟踪误差和室内原理实验拼接成功率大于90%的技术指标,有效地保证了激光通信网络体系的正常运行。

关键词 激光通信;组网;中继天线;光束伺服

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0914001

Multi-Point Laser Communication Optical Relay Antenna Servo System

Yu Xiaonan Tong Shoufeng Jiang Huilin Zhang Lizhong Dong Yan Bai Yangyang

*Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Using the servo oscillating reflector antenna based on the rotating paraboloid principle, one-to-many laser communication network can capture, track and communicate with the laser signal coming from multipoint optical transceiver so as to form the space laser communication network. The basic principle, architecture, tracking algorithm and the stitching technology of the servo antenna system are discussed. The rotating paraboloid principle is proved and the feasibility analysis of servo mirror antenna is given. It also introduces the closed-loop structure of tracking system and separately elaborates the component and index of the sensor, actuator, controller. Proportion integration differentiation (PID) algorithm with actuator limit, which is used for spot tracking, and debugging method are given. In order to achieve continuous tracking, the multi-reflector stitching technology is introduced, which mainly clarifies the implementation method of the reflectors. The whole servo antenna system is designed to test the perform range, tracking precision and stitching reliability. In the end, the qualification including 360° omnidirectional execution, tracking error less than 50 μrad and over 90% reliable stitching under indoor principle experiment can be achieved, which makes the laser communication network system operate normally.

Key words laser communication; network; relay antenna; beam servo

OCIS Codes 060.2605; 140.3295; 140.3460; 280.3400; 350.6090

1 引言

继点对点激光通信之后,空间激光组网通信使空间激光通信走向实用化,故对于构建星间激光通信链

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91338116)

作者简介: 于笑楠(1989—)男,博士研究生,主要从事激光跟瞄与伺服控制方面的研究. E-mail: yuxiaonan1989@126.com

导师简介: 佟首峰(1972—)男,教授,博士生导师,“长江学者”特聘教授,主要从事空间遥感与激光通信等方面的研究. E-mail: tsf1998@sina.com(通信联系人)

路网有着重大的意义。目前国内外大多数自由空间激光通信系统均为点对点实验性系统,而本文所涉及的课题为一点对多点的网络化激光通信,这就需要设计并控制一个中继光学天线,将多路光束进行中继。在前期工作的基础上,主要论述激光通信组网链路伺服系统的详细设计。文献[1]是激光通信组网链路控制系统的总体方案,提出了组网伺服天线的结构、原理、控制系统选型、组成,并对电机传递函数控制参数等进行了论证和测试,完成了电机闭环。文献[2]论述了组网中期实验情况,主要讨论组网系统对单一光束的伺服能力,实现了光闭环。在此基础上,本文是整个组网系统联调总结:以更加严密的抛物线公式阐述组网伺服天线设计原理,并对多光束跟踪的系统设计与参数进行了论证,包括探测器的脱靶量提取和控制系统架构及算法;接着论述了多面反射镜的拼接技术,这是实现全向跟踪与捕获的关键技术;最后,得到了360°全向执行,小于50 μrad跟踪误差和室内原理实验拼接成功率大于90%的技术指标,有效地保证了激光通信网络体系的运行。与文献[2]中所论述的基于CCD的光束跟踪所不同的是,为了降低成本、简化系统,本文将多光束闭环敏感器换成了四象限探测器组,由多个象限雪崩光电二极管组成的探测器组为组网的实用化开辟了道路,更加适合于星间激光通信网络^[3]。

2 旋转抛物面光学伺服天线结构

组网多光束伺服的基本原理为旋转抛物面的光学性质,即对任意过焦点的光线,经抛物面反射后均为平行光。离散化的旋转抛物面参数方程为

$$x = k \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot i\right), \quad (1)$$

$$y = k \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot i\right), \quad (2)$$

$$z = x^2 + y^2, \quad (3)$$

式中 xyz 为曲面坐标, k 为比例系数, i 为累加离散点, N 为每周期离散点总数。

在此基础上,对理想旋转抛物面进行离散化,得到近似的拼接图样,如图1所示。



图1 抛物线渐变图

Fig.1 Schematic diagram of the change of parabola

如图1所示拼接图样,结合结构约束,进行选型,选型依据为组网链路数(即可以跟踪的最多光路数)、天线口径(整体伺服系统口径,应与接收光管匹配)和伺服范围(单个伺服转台需要执行的范围),参考表1。

表1 结构选型表

Table 1 Structure selection table

Number of mirror	Link number	Antenna aperture /mm	Servo range /(°)
4	4	260	±45
6	6	400	±30
8	8	530	±22.5

由表1可知,4片反射镜结构组网链路数过少,并不能有效验证组网系统功能,8片反射镜结构天线口径过大,与对应接收光管不能够良好匹配,故折中选择6片反射镜结构,对于伺服范围而言,由6片到8片对伺服需求的缓解并不如4片到6片对于伺服需求的缓解。因此设计了一个旋转抛物面伺服天线,采用6面反射镜拼接技术完成曲面控制,结构如图2所示。

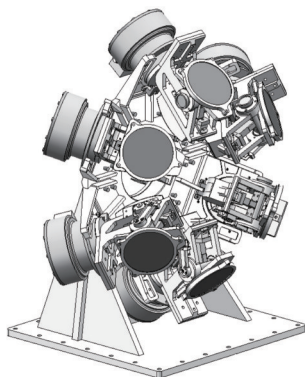


图 2 多面反射镜结构图

Fig. 2 Polygon mirror structure diagram

由图 2 可见,6 具二自由度伺服转台负载 6 片平面反射镜,通过伺服电机协调工作,实现旋转曲面的功能。其中,俯仰轴系摆动范围为 $\pm 8^\circ$,方位轴系运动范围为 $\pm 30^\circ$,该结构可以有效覆盖抛物曲面。

依据上述原理与结构,外部任意方向通信光束均可经过抛物面反射镜系统,被通信探测器接收,在跟踪的基础上,实现激光通信组网^[5-6]。

3 多光束跟踪控制系统架构与算法

在抛物线光学天线的控制上,采用控制局域网(CAN)总线作为多轴伺服的主控总线,主控制器发送控制字至子伺服器,子伺服器发送状态字至主控制器,实际上搭建了基于一对多状态机的控制模式。

每个十字跟踪架配置 1 个四象限探测器(QD),对应 1 束外来光束,完成光闭环伺服,实现对多路光束稳定跟踪。

控制系统架构如图 3 所示,包括一对多伺服天线控制本体、400 mm 直径接收光管、象限探测器阵列、接收处理模块、主控制器、执行器驱动组等。其中,多路光信号入射伺服天线系统,根据抛物面的光学原理,光信号经过捕获能够进入接收光管被探测器探测。原系统使用光电耦合器件(CCD)进行位置探测,使用雪崩光电二极管(APD)进行通信。但是,CCD 和 APD 的经典激光通信方案,在多路光束通信上,显得过于复杂、繁重,在真正实用的激光通信网络系统中,通常使用四象限 APD 探测器完成跟踪与通信的复合探测功能。

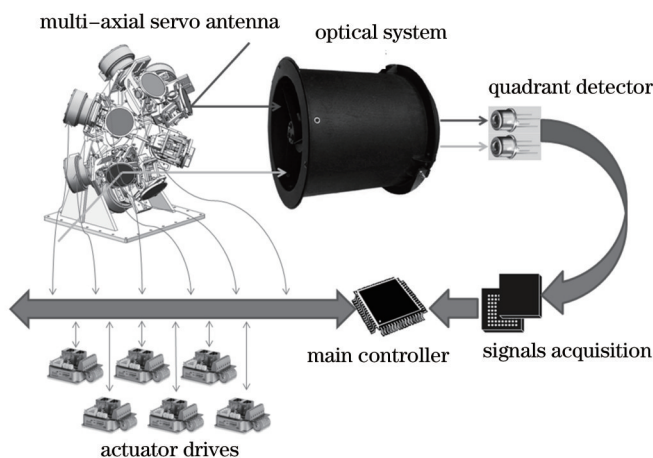


图 3 控制系统架构图

Fig.3 Control system architecture diagram

采用 QD 作为主敏感单元,兼顾通信与跟踪双重功能,其中,每一个 QD 对应一个闭合控制回路,完成一路光束的跟踪与通信任务。QD 使用 EOS 公司 1 mm QD 探测器,信号光经过互阻放大器进行电流到电压放大、低通滤波、模数(AD)采集,实现脱靶量的提取^[7]。信号传递原理推导如下:

探测器在反偏电压下工作,将各象限光功率转换为电流,有

$$I_q = K_q P_q, \quad (4)$$

通过互阻放大器(TIA)对电流信号进行放大,转换为电压信号,有

$$V_Q = K_T I_Q, \quad (5)$$

式中 P_Q 为单象限接收光功率, K_Q 为象限探测器灵敏度, V_Q 为象限放大电压, K_T 为互阻放大器增益, 由此得到求和电压, 即 ABCD 四象限象限电压和:

$$V_S = V_A + V_B + V_C + V_D. \quad (6)$$

还可得到对应方位俯仰脱靶量电压 V_x, V_y :

$$V_x = \frac{V_A - V_B + V_D - V_C}{V_S}, \quad (7)$$

$$V_y = \frac{V_A - V_D + V_B - V_C}{V_S}. \quad (8)$$

对于光束跟踪算法, 采用带执行器饱和和比例积分(PI)控制器, 控制原理如下: 设 u 为执行量, e 为 QD 计算得到的脱靶量信息, K_p, K_i 分别为比例系数和积分系数, m 为系统误差均值, 则经典比例积分算法和最终输出量 O 可表示为

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot m, \quad (9)$$

$$O = \begin{cases} u, & u < L \\ L, & u > L \end{cases}. \quad (10)$$

原有 u 经过了一次极限环限位 L , 能够显著提高精度^[8]。(4)~(10)式分析伺服天线控制系统中的反馈和执行环节的传递函数, 得到控制框图如图 4 所示。

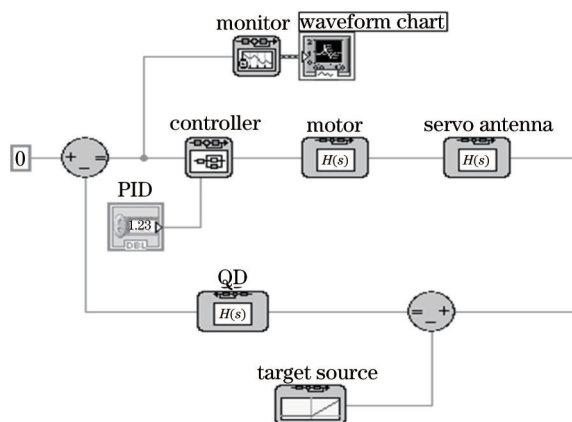


图 4 系统控制框图

Fig.4 Diagram of the control system

图 4 为整个系统的控制架构, 该系统为一伺服跟踪系统, 控制目的为保持脱靶量趋近于 0, 控制算法为带死区的比例积分和均值滤波, 电机和伺服天线及探测器的控制传递函数不易得到, 故这里采用对各子系统阶跃响应估算时间常数的方法来确定系统性质, 并予以补偿。

具体实验上, 设计了基于上位机快速参数整定和时域误差评价的调节整定方式, 该方法在目标源运动中, 对光斑脱靶量进行实时监测。再通过总线在线对 PI 参数及死区范围进行调整。力求误差在指标范围内。

调整步骤如下:

- 1) 通过比例控制将光束闭环, 此时光斑脱靶量显示等幅度振荡;
- 2) 加入非线性极限环, 对输出进行约束, 限制输出量, 减小振荡, 提高稳定性;
- 3) 使用均值滤波, 得到误差的平均值, 将平均值加入控制量, 补偿脱靶量。

4 多反射镜拼接技术与实验

对于连续的多点动平台激光通信来说, 上述天线结构中的多面反射镜的准确可靠拼接是连续通信的基础。下面详细讨论反射镜拼接过程。

定义原跟踪反射镜和待跟踪反射镜, 当目标源运动至原跟踪反射镜伺服边界时, 待跟踪反射镜启动, 此

时控制器读取原跟踪反射镜电机编码器读数,此读数与装调时标校的双反射镜平行基准进行比较,得到的差值即为待跟踪反射镜运动目的位置。利用CCD观察相机,观察得到的交接过程如图5所示。

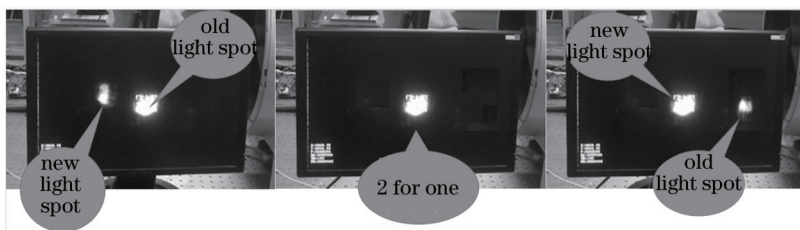


图5 交接过程观察相机图像

Fig.5 Camera image observation

如图5所示,要完成反射镜拼接,首先需要对接服天线进行标校,标校方法为利用CCD观察相机,将双反射镜反射的双光斑调至与靶心重合。记录此时两反射镜位置为 P_1 和 P_2 。则相对位置为

$$P_r = P_1 - P_2. \quad (11)$$

开始跟踪实验,到达交接区后,读取此时原跟踪反射镜位置,定义为 P_o ,则新跟踪反射镜执行量为

$$P_n = P_o + P_r. \quad (12)$$

这时,双反射镜平行,双光斑重合,原反射镜撤回,这样能保证最高的能量利用率。

上述为拼接基本算法,但是要实现可靠拼接,需要处理好双光斑问题,即在反射镜交接过程中,当两片反射镜共面时,由于同时反射入射光,且存在指向误差,故会在QD探测器靶面上同时产生两处光斑,效果图如图5左图所示,这种情况下,会在交接区影响跟踪系统稳定性。处理双光斑问题需要对探测器算法进行优化,根据(4)~(8)式, V_s 与探测器接收光能量成正比,在跟踪阶段,

$$V_s = K_Q K_T P_s = K_L P_L, \quad (13)$$

式中 K_L 为光学系统衰减系数, P_L 发光功率;

在交接阶段,

$$V_s = K_Q K_T P_s = K_{L1} P_{L1} + K_{L2} P_{L2}, \quad (14)$$

式中 K_{L1}, K_{L2} 分别为相对于两片反射镜的光学系统衰减系数,满足

$$K_L \leq K_{L1} + K_{L2} \leq 2K_L. \quad (15)$$

因此,在交接阶段,需要实时读取 V_s ,作为交接进行的判据,双光斑时, V_s 产生跳变增大,以此阶跃信号作为撤离原反射镜的标志,原反射镜快速撤离,新反射镜移动到指定位置,此时剩余单光斑, V_s 产生跳变减小,以此阶跃信号作为新反射镜开始跟踪的信号。

以上述控制原理,对接服天线的拼接技术进行了长期测试,表2列出5次典型的测试实验。

表2 拼接实验记录

Table 2 Stitching test record

Data	Number of stitching	Success rate of stitching /%
2014.5.10	6	50
2014.5.20	6	100
2014.5.30	6	100
2014.6.6	12	91.6
2014.6.15	24	95.8

表2中,2014.5.10实验为未加交接段能量算法的6次拼接,仅有3次成功。纠正了该问题后,又进行了2个批次的6次拼接实验,拼接成功率均为100%。而后进行了长期实验,即12次和24次的多次拼接,成功率均为90%以上,下面对失败原因进行分析,2014.6.6实验中,第1次拼接时没有成功,失败原因是拼接反射镜未能执行到预定拼接位置,事后分析是因为方位轴电机增量式编码器在电机高速运动中有丢数现象,后调整了电机执行速度,满足编码器采样率后,问题解决。2014.6.15实验,后期拼接失败一次,分析原因可能为经过长时间反复交替拼接,伺服天线电机运动产生积累误差,目标模拟源电机运动产生积累误差,双方相对

指向逐渐改变,最终失明。解决办法应为在目标模拟源端也加入伺服链路,实现双向跟踪,通过参考通信光消除积累误差。但是由于经费及时间所限,模拟源仍为开环控制,此问题有待解决。

5 复合跟踪实验

在多点激光通信跟踪实验中,考虑目标等速等高通过中继站,图6为跟踪等高飞行目标的角度关系^[9]。

点O为伺服中继天线所在位置,跟踪以速度V,高度Z₀,作直线飞行的目标。X₀为渡越点的水平距离。根据几何关系有

$$A = \arctan \frac{Vt}{X_0}, \tag{16}$$

$$E = \arctan \frac{Z_0/X_0}{\sqrt{1 + (Vt/X_0)^2}}. \tag{17}$$

以A为例,分析目标源运动的最大角速度,对(16)和(17)式求导有

$$\frac{dA}{dt} = \frac{V}{X_0} \cos^2 A, \tag{18}$$

$$\frac{d^2 A}{dt^2} = -\left(\frac{V}{X_0}\right)^2 \sin(2A) \cos^2 A. \tag{19}$$

以此知最大运动角速度为V/X₀,最大角加速度为0.65(V/X₀)²。

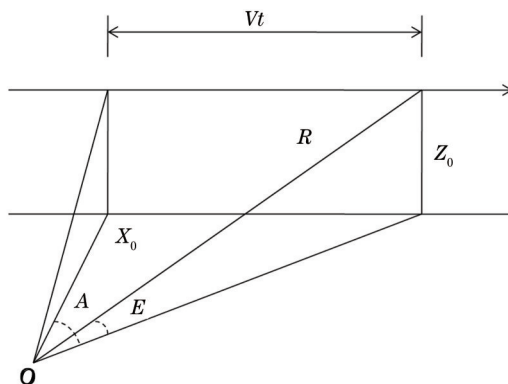


图6 目标运动关系

Fig.6 Relation of target motion

上述分析为目标源运动基础,伺服中继天线对上述目标进行跟踪。设目标源等效最大角速度为0.5°/s,角加速度0.16°/s²。得到跟踪误差数据如下,图7~10分别为850 nm激光信道方位轴和俯仰轴,1550 nm激光信道方位轴和俯仰轴的跟踪误差曲线。图7~10中,横轴为实验时间采样点,采样间隔为50 ms,纵轴为读取的脱靶量信息,850 nm信道位置分辨率为5 μrad,1550 nm信道位置分辨率为2 μrad。

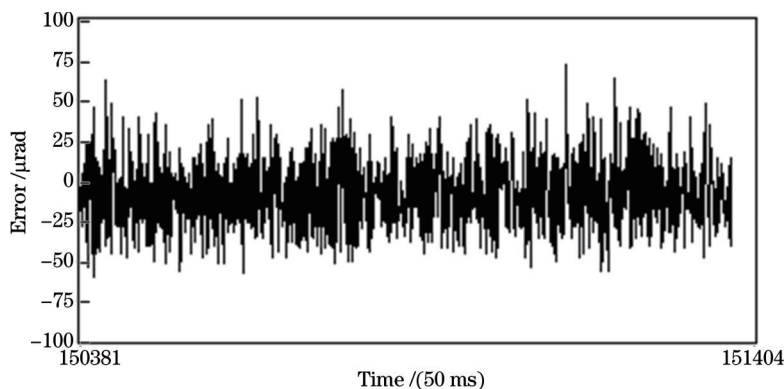


图7 850 nm激光束X轴跟踪误差

Fig.7 850 nm laser beam X axis tracking error

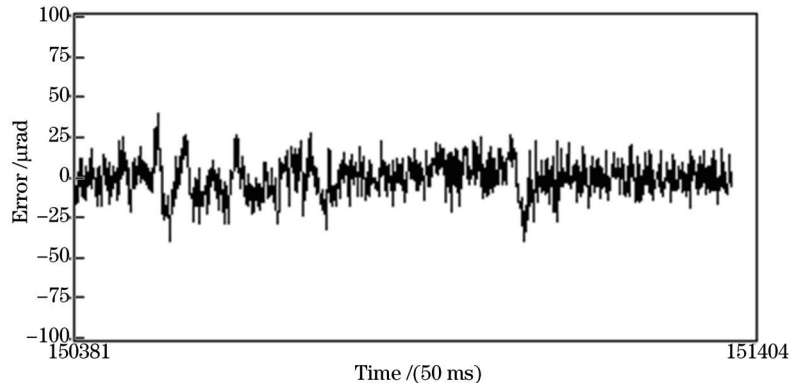


图 8 850 nm 激光束 Y 轴跟踪误差

Fig.8 850 nm laser beam Y axis tracking error

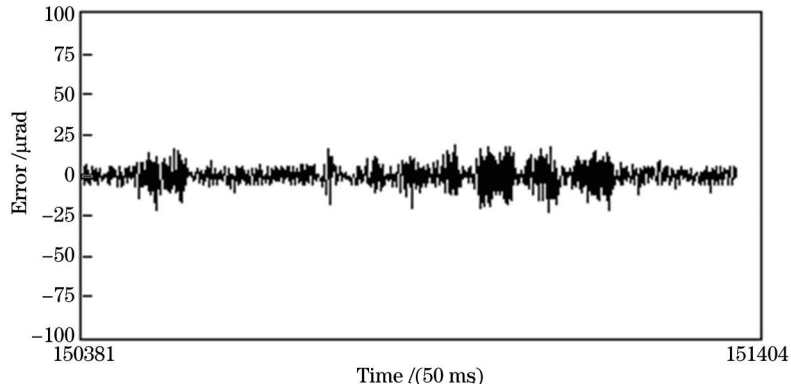


图 9 1550 nm 激光束 X 轴跟踪误差

Fig.9 1550 nm laser beam X axis tracking error

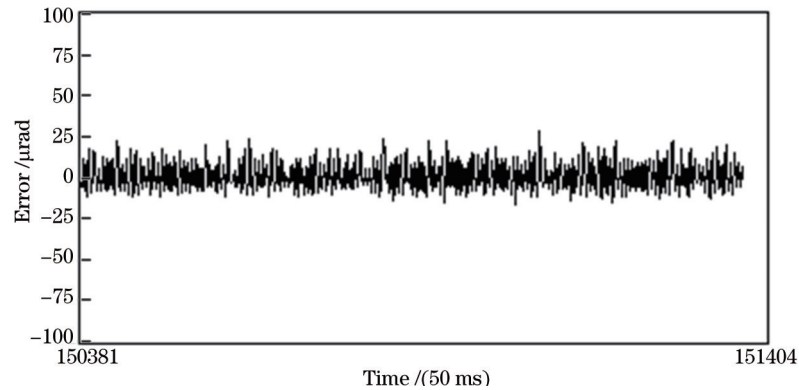


图 10 1550 nm 激光束 Y 轴跟踪误差

Fig.10 1550 nm laser beam Y axis tracking error

由图 7~10 可见, 850 nm 信道方位轴跟踪误差为 $50 \mu\text{rad}$ (3σ), 俯仰轴跟踪误差为 $25 \mu\text{rad}$ (3σ), 1550 nm 信道方位轴跟踪误差为 $17 \mu\text{rad}$ (3σ), 俯仰轴跟踪误差为 $20 \mu\text{rad}$ (3σ)。对于 850 nm 误差较大的问题(仍满足指标要求), 分析原因可能为闭环振荡和光轴不正交。

各轴跟踪指标均满足多点激光通信要求, 可以实现有效通信, 室内实验证明, 跟踪系统运行良好, 能够保证通信系统连续低误码率工作。

6 结 论

论述了激光通信网络建设中重要的中继伺服天线的设计与研制过程。说明了基于旋转抛物面的伺服天线原理, 探讨了多光束伺服跟踪系统组成与架构, 介绍了反射镜拼接、QD 探测、控制算法等实际技术细节, 最后进行跟踪与拼接实验, 得到了良好效果, 其中拼接可靠性成功率大于 90%, 跟踪误差小于 $50 \mu\text{rad}$

(3σ)。实现了当初提出的设计指标(90%拼接成功率, $50 \mu\text{rad}$ 跟踪误差),保障了组网通信系统的可靠运行,通信组测试通信误码率小于 10^{-7} 。该误码率与非跟踪状态下通信误码率相当,说明伺服系统运行良好,对通信误码率没有影响。

但是,本系统仍有一些不足,如没有加入基于振镜的精跟踪系统,对高动态目标跟踪性能并不理想;十字跟踪架结构较复杂,构建多反射镜系统时会极大地增加控制系统复杂度等,这将在以后的系统中逐渐完善。

参 考 文 献

- 1 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, *et al.*. Research on control systems of space laser communication networking[C]. The 2013 Conference and Seminar Space Electromechanical Technology China Institute of Space Science Collection, 2013: 180-185.
于笑楠, 佟首峰, 姜会林, 等. 激光通信组网控制系统研究[C]. 中国空间科学学会 2013 年空间光学与机电技术研讨会会议论文集, 2013: 180-185.
- 2 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Dong Yan, *et al.*. Single beam tracking subsystem of space lasercommunication network[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3348-3353.
于笑楠, 佟首峰, 董岩, 等. 空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3348-3353.
- 3 Zhao Shanghong, Li Yongjun, Wu Jili. The Technology of the Satellite Laser Communication Net[M]. Beijing: Science Press, 2010: 23-32.
赵尚弘, 李勇军, 吴继礼. 卫星光网络技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 23-32.
- 4 Beyer W H. CRC standard mathematical tables[J]. Boca Raton, FL: Chemical Rubber Company, 1987: 45-46.
- 5 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. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- 6 Li Long, Zhang Lizhong, Hong Jin. Design and analysis of antenna structure of laser optical communication network[J]. Science & Technology Information, 2014, 9: 8-9.
李龙, 张立中, 洪近. 激光通信组网光学天线结构设计与分析[J]. 科技资讯, 2014, 9: 8-9.
- 7 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Zhao Xin, *et al.*. The simulation system of the beacon pointing and acquisition process of the satellite laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805007.
于笑楠, 佟首峰, 赵馨, 等. 基于合作信标的卫星激光通信瞄准捕获仿真系统[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805007.
- 8 Liu Sheng. Modern Servo System Design[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001: 128-135.
刘胜. 现代伺服系统设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001: 128-135.
- 9 Wang Guangxiong, He Zhen. Control System Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 117-122.
王广雄, 何朕. 控制系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 117-122.

栏目编辑: 王晓琰