

空间激光通信组网反射镜联动跟踪控制技术

王俊尧 宋延嵩 佟首峰 姜会林 董岩 董科研 常帅

Linkage tracking control technology of space laser communication network mirror

WANG Jun-yao, SONG Yan-song, TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin, DONG Yan, DONG Ke-yan, CHANG Shuai

引用本文:

王俊尧, 宋延嵩, 佟首峰, 姜会林, 董岩, 董科研, 常帅. 空间激光通信组网反射镜联动跟踪控制技术[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 537-546. doi: 10.3788/CO.2019-0176

WANG Jun-yao, SONG Yan-song, TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin, DONG Yan, DONG Ke-yan, CHANG Shuai. Linkage tracking control technology of space laser communication network mirror[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 537-546. doi: 10.3788/CO.2019-0176

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.2019-0176>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术

Coarse tracking technology of secondary imaging Coude-type laser communication terminal

中国光学. 2018, 11(4): 644 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0644>

星载激光通信技术研究进展

Progress of research on satellite-borne laser communication technology

中国光学. 2019, 12(6): 1260 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1260>

星间激光通信终端光学天线的隔离度

Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals

中国光学. 2017, 10(4): 462 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0462>

离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学. 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

空间激光通信最新进展与发展趋势

Latest developments and trends of space laser communication

中国光学. 2018, 11(6): 901 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0901>

空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术

Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection

中国光学. 2019, 12(3): 486 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0486>

空间激光通信组网反射镜联动跟踪控制技术

王俊尧^{1,2}, 宋延嵩^{1*}, 佟首峰¹, 姜会林¹, 董岩¹, 董科研¹, 常帅¹
(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. 长春理工大学光电工程学院, 吉林长春 130022)

摘要:为提高光学天线能量利用效率,实现空间激光通信组网,本文对反射镜联动跟踪控制技术展开研究。首先,阐述了系统组成原理,详细论述了基于单探测器多执行器的反射镜联动跟踪控制策略。接着,通过分析激光链路能量,得到了联动跟踪约束条件及误差要求。然后,建立了双反射镜联动跟踪数学模型,对伺服控制器进行仿真。最后,搭建原理样机对跟踪性能进行测试。实验结果表明,系统能够对目标进行稳定跟踪,跟踪脱靶量精度优于 83 μrad ,双镜联动精度优于 26 μrad ,系统接收光功率显著提高。本文研究为实现空间一对多激光通信链路组网奠定了基础。

关键词:激光通信;组网;联动跟踪;跟踪精度;光功率

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A doi: 10.3788/CO.2019-0176

Linkage tracking control technology of space laser communication network mirror

WANG Jun-yao^{1,2}, SONG Yan-song^{1*}, TONG Shou-feng¹, JIANG Hui-lin¹,
DONG Yan¹, DONG Ke-yan¹, CHANG Shuai¹

(1. *Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*
2. *School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

* *Corresponding author, E-mail: songyansong2006@126.com*

Abstract: In order to improve the energy utilization efficiency of the optical antenna and realize the space laser communication networking, we study the mirror linkage tracking control technology. The principle of system composition is described, and a mirror linkage tracking control strategy based on a single-detector multi-actuator is discussed in detail. By analyzing the energy of a laser link, its linkage tracking constraints and error requirements are obtained. A mathematical model of double mirror linkage tracking is established. The servo controller is designed and simulated, and the prototype is built to test its tracking performance. The

收稿日期:2019-09-09; 修订日期:2019-11-08

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(No.91838301)

Supported by National Natural Science Foundation of China Major Research Project (No.91838301)

experimental results show that the system can track the target stably, the tracking target accuracy is better than $83 \mu\text{rad}$, the double mirror linkage accuracy is better than $26 \mu\text{rad}$ and the received optical power of the system is significantly improved. The research in this paper lays a foundation for space one-to-many laser communication link networking.

Key words: laser communication; networking; linkage tracking; tracking accuracy; optical power

1 引言

空间激光通信具有传输速率高, 通信容量大, 体积小, 功耗低, 保密性强等优势, 近年来已成为空间通讯的研究热点。而利用激光通信组网能实现信息的有效利用、提高星间信道的可靠性、增大通信终端的通信覆盖范围, 是未来空间激光通信的发展趋势^[1-6]。

为实现空间激光通信组网, 系统必须具备对多目标光束的协同控制能力, 传统空间激光通信基本都为一对一形式, 无法实现多目标同时接入, 难以满足链路组网的需求。因此, 具有多点激光通信功能的光端机成为空间激光通信组网的核心关键。

美国提出的天基激光通信(TSAT)计划^[7-8]和日本提出的双层低轨道全球通信组网计划^[1], 都是采用射频微波通信和空间激光通信相结合的组网方式。这种方式具有覆盖范围广, 多种通信方式互补等优势, 可以应用于星间、星地、地面站与移动用户等多种终端的组网通信。但代价是结构过于复杂, 实施难度极大。国内, 长春理工大学提出了基于反射镜拼接光学天线的一对多的空间激光通信技术方案^[9-13], 并研制出原理样机, 在室内实现了“一对二”的空间激光通信^[10]。此方案具有视场大, 结构简单等特点, 有利于实现系统小型化。但存在伺服控制难度大, 光能量利用率低的问题。本文基于多反射镜拼接光学天线结构, 对空间激光通信组网跟踪系统进行优化, 使用双镜联动跟踪架构取代单镜跟踪, 实现了对目标的稳定跟踪。此外, 还验证了反射镜联动跟踪技术的可行性, 同时使系统接收光功率得以大幅提高, 有效改善了原系统激光能量利用率低的问题。

2 粗跟踪系统的组成原理

2.1 系统组成

粗跟踪系统由光学天线系统、卡塞格林光学接收系统、分光系统、跟踪相机, 图像处理单元及伺服控制系统组成, 其结构框图如图 1 所示。

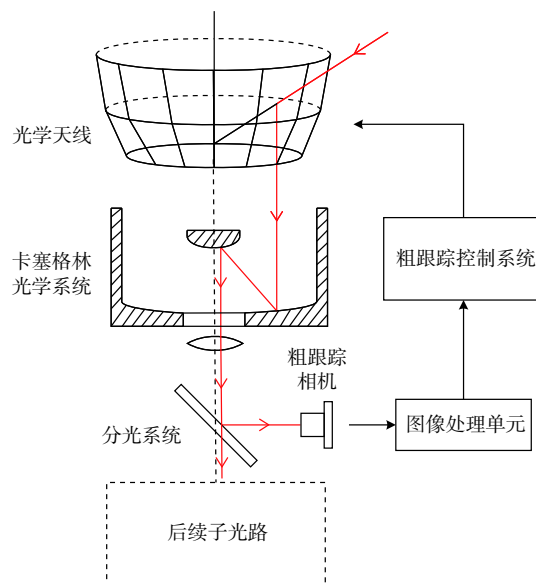


图 1 粗跟踪系统组成

Fig. 1 Composition of coarse tracking system

系统采用面阵 CCD 相机作为跟踪传感器, 进行信标光探测, 对其输出的视频信号进行前置放大、滤波和阈值检测之后, 得到跟踪脱靶量信号。此过程由基于 FPGA 的图像处理单元负责完成。在此基础上, 伺服控制单元根据脱靶量信号生成电机控制量, 控制反射镜偏转, 实现对目标的动态跟踪, 并将误差控制在精跟踪视场内。

为了增大光学天线的可视范围, 以实现多目标同时通信, 光学天线设计成以旋转抛物面为基

底的多反射镜拼接结构^[11],如图2所示。根据旋转抛物面原理,当入射光线的指向聚于焦点时,反射光线与旋转轴平行^[13]。设计构想中,本系统将作为主光端机,最多可与3个从光端机同时进行通信。对于来自不同轨道的信号光束,将由与之匹配的反射镜反射进入系统,再分别进行探测接收。

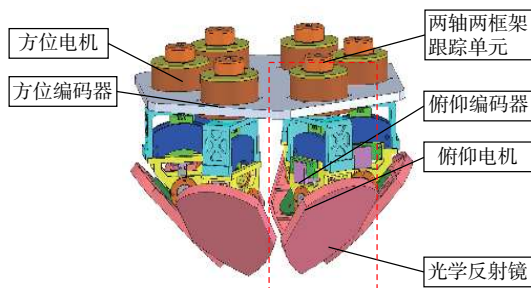


图2 多反射镜拼接光学天线

Fig. 2 Multi-mirror splicing optical antenna

为了使空间得到合理利用,光学天线由6块反射镜组成,每块反射镜对应一个跟踪单元,跟踪单元采用两轴两框架结构,由2个力矩电机直接驱动方位、俯仰轴偏转。每片反射镜将在活动范围边界区域与相邻反射镜进行拼接,以使系统的方位可视范围达到360°。为实现相邻反射镜间无缝衔接,同时考虑留有一定重叠区域,单个反射镜的转动范围确定如下:方位角为 $\pm 61^\circ$,俯仰角为 $\pm 19^\circ$ 。

2.2 粗跟踪控制策略

对于空间激光通信组网系统,由于单个反射镜面积有限,只能反射部分激光能量,从而会造成链路损耗。为了提高光能利用率,增加光束反射面积,以提高激光通信能量,本文提出了一种双反射镜联动跟踪方案,通过两片反射镜联动从而实现同一束入射光进行捕获、跟踪、瞄准。

传统光电跟踪系统为单探测器单执行器伺服系统,常规的方法是使用单反射镜作为伺服执行机构对目标进行跟踪,信标光束经过反射后进入光学系统最终在相机靶面上成像,形成光闭环。本方案与其的主要区别在于,执行器由一个变为两个,但探测器保持为一个不变,跟踪时,主光端机探测器靶面上由两个反射镜实现光斑联合成

像,如图3所示。由于两反射镜的光斑之间存在耦合,不能简单地使用光斑脱靶量对两个反射镜进行光闭环控制。针对这一问题,本文在光闭环的基础上加入位置闭环,根据编码器信息实现两片反射镜的角度匹配,如图4所示。要实现稳定跟踪,希望光斑尽量重合。此方案的主要技术难点在于控制反射镜同步。因此,基于单探测器多执行器的联动控制跟踪技术是本文的关键技术之一。

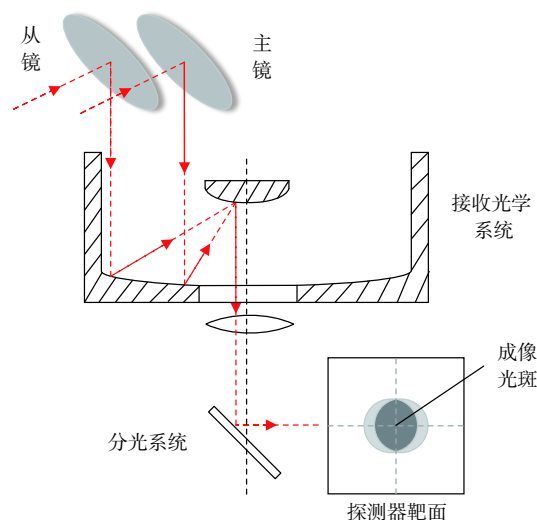


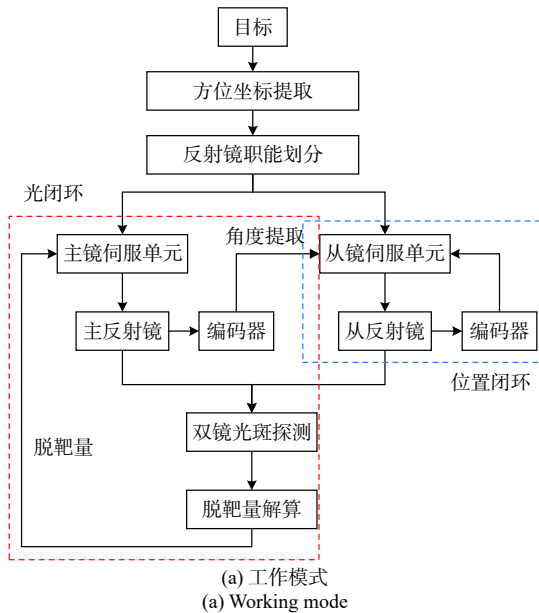
图3 双镜光斑联合成像示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double mirror spot combined imaging

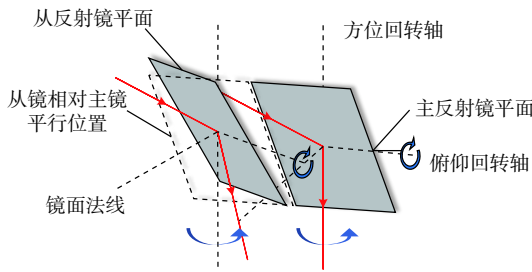
联动跟踪工作模式如图4(a)所示,通过提取目标方位坐标,确立反射镜职能,将对应角度范围的相邻反射镜分为一个主反射镜一个从反射镜。其中,主反射镜负责跟踪光斑图像,CCD相机作为系统中唯一的探测器,向主反射镜提供脱靶量信息,从而构成光闭环跟踪系统。从反射镜使用自身编码器构成位置闭环并根据主反射镜的编码器角度信息进行随动。当两反射镜间存在角度差时,如图4(b)所示,通过调整从反射镜以维持镜面平行,实现双反射镜对目标的联动跟踪,保证激光通信的顺利进行。

反射镜职能分配方式如图5所示,所有反射镜从1到6进行编号,光学天线的工作范围以30°为界将360°划分为12个区域,每个反射镜占有左右两侧共60°的判定范围,根据来光方向对各反射镜职能进行分配,确立主从关系。当信标光

来自图中方向 1 时, 目标位于反射镜 1 的左侧区域, 此时, 反射镜 1 将作为主镜对目标进行主动跟踪,



(a) 工作模式
(a) Working mode



(b) 反射镜运动关系
(b) Mirror motion relationship

图 4 双镜联动跟踪架构

Fig. 4 Double mirror linkage tracking architecture

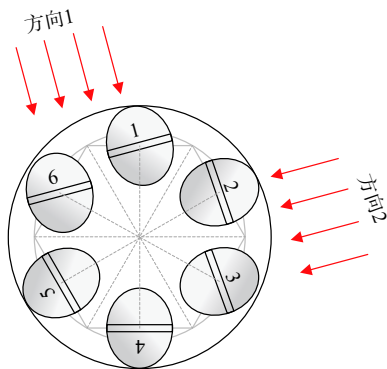


图 5 反射镜位置关系

Fig. 5 Position relationship between mirrors

其左侧相邻反射镜 6 则成为从镜对反射镜 1 进行随动, 协助反射镜 1 实现双镜跟踪。同理, 信标光来自方向 2 时, 反射镜 2 为主镜, 3 为从镜, 以此类推。当目标运动到一定角度时, 反射镜职能切换, 结束工作的反射镜回到初始位置待命, 新的反射镜接替前者工作继续对目标进行跟踪。

2.3 双光斑位置探测

双光斑中心位置检测图如图 6 所示。由图 6 可知, 双光斑同时成像时, 设主从反射镜光斑中心坐标分别为 $O_1(x_1, y_1)$, $O_2(x_2, y_2)$, 由几何关系可知, 双镜光斑等效位置的中心坐标为

$$(x_0, y_0) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right). \quad (1)$$

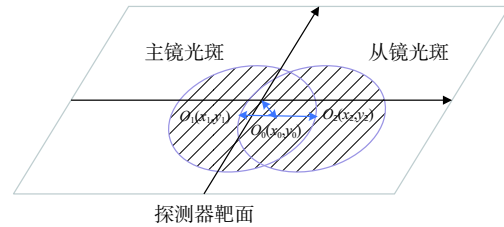


图 6 双光斑中心位置检测

Fig. 6 Double spot center position detection

为了提高探测精度, 本系统在图像处理单元中采用基于目标灰度信息的 CCD 光斑探测像素细分技术, 使用带有阈值检测的质心跟踪算法, 通过将原始图像与二值化阈值做差, 剔除背景噪声的干扰, 同时减小光斑抖动对位置检测的影响, 实现双镜光斑图像的高精度探测定位。

对于由 $a \times b$ 个像素点构成的探测器靶面, 通过对每个像素灰度值进行采样, 计算得到双光斑等效位置中心坐标 (X, Y) ,

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b [H(x_i, y_j) - T] x_i}{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b [H(x_i, y_j) - T]} \\ Y = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b [H(x_i, y_j) - T] y_j}{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b [H(x_i, y_j) - T]} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $H(x_i, y_j)$ 为对应像素点的灰度值; T 为设定的阈值门限; x_i, y_j 为对应像素坐标。

3 联动跟踪光能量分析

空间激光通信链路模型可表述为:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_t \cdot L_s \cdot \eta_s \cdot L_{APT} \cdot G_r \cdot \eta_r, \quad (3)$$

式中: P_r 为接收信号功率, P_t 为激光发射功率, G_t 与 G_r 分别为发射, 接收光学天线增益, η_t 与 η_r 分别为发射, 接收光学系统效率, L_s 为空间链路衰减系数, η_s 为信道功率损耗, L_{APT} 为伺服系统对准失配功率衰减。通过式(3)可以看出, 当光学天线增益

提高, 其他参数不变时, 接收信号功率将提高。

本系统的空间光路如图 7 所示, 可见, 从光端机所发射的光束经由主光端机光学天线阵列反射接收, 当联动误差较小时, 双反射镜光斑同时完成探测成像, 相当于接收光学天线的增益提升了一倍, 则接收光功率可提升近一倍; 同时, 主光端机的发射光束经过光学天线阵列双镜反射后可看作双孔径发射, 这可等效为发射光学天线增益提升, 到达从光端机的光场分布由两束光叠加构成, 但此时的从光端机接收光功率增益需要考虑光斑分布的影响。

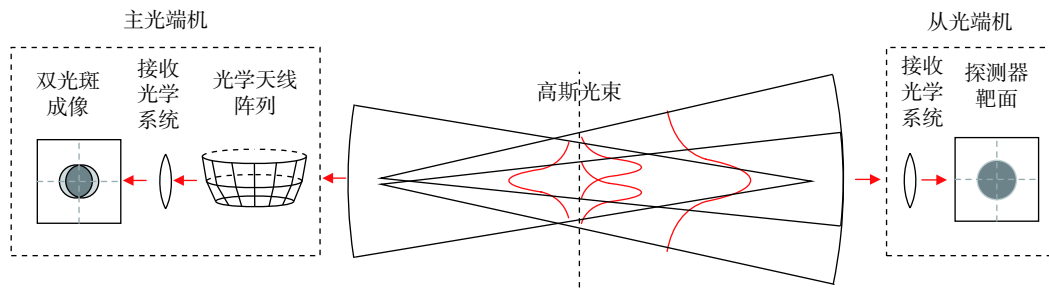


图 7 空间光路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of space light path

通信光远场功率分布近似为高斯分布, 高斯光由于对准失配所产生的功率衰减可表示为^[14]:

$$L_{APT}(\varepsilon) \approx \exp\left[-8\left(\frac{\varepsilon}{\theta_{div}}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中: ε 为主光端机的瞄准误差, θ_{div} 为通信光束散角。

主光端机所发射的通信光束远场功率分布可看作两个高斯分布的叠加, 如图 8 所示。

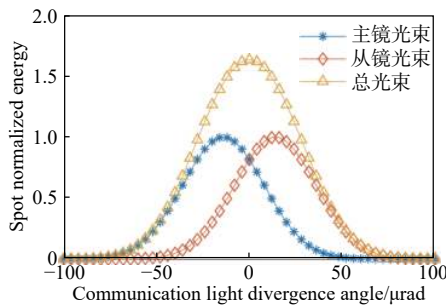


图 8 发射通信光束远场功率分布

Fig. 8 Far-field power distributions of transmitted communication lights

结合式(4)得到, 此时从光端机所接收的通信光功率相较于使用单镜时的增益为:

$$G_L = \frac{P'_r}{P_r} = \frac{L_{APT}\left(\frac{\varepsilon_L}{2} + \varepsilon\right) + L_{APT}\left(\frac{\varepsilon_L}{2} - \varepsilon\right)}{L_{APT}(\varepsilon)}, \quad (5)$$

式中: ε_L 为联动误差, 其物理意义为主从反射镜法线分离角度。可以看出, 当通信光束散角与主光端机瞄准误差一定时, 通过提高反射镜平行度, 降低联动误差可以提高光学天线增益, 使链路能量提升, 增大安全余量。根据式(3)、式(4)、式(5), 结合设计指标, 设定主光端机通信光束散角 $\theta_{div} = 80 \mu\text{rad}$, 取主光端机瞄准误差 $\varepsilon = 3 \mu\text{rad}$, 若使从光端机接收光功率提高 60%, 需要联动误差 $\varepsilon_L \leq 26.7 \mu\text{rad}$ 。

4 双镜联动粗跟踪技术

4.1 双镜联动粗跟踪数学模型

本文所提出的联动跟踪方案采取单探测器多执行器工作方式, 从反射镜职能出发, 将系统分为

一主一从两个反射镜控制回路,其中,主镜回路为光闭环跟踪系统,作用是将目标光斑拉入精跟踪视场,从镜回路是位置随动伺服系统,作用是保持双镜镜面平行,运动同步。整个系统结构框图如图 9 所示。

图中,实线部分为主反射镜控制回路,虚线部分为从反射镜控制回路。系统输入输出分别为 θ_i 和 θ_o 。 D_1 为光斑位置探测模型函数,包含光斑探测增益,图像采样保持及信号传输延时等环节。 D_2 为编码器位置检测模型函数, $C_1(s)$ 为主反射镜位置补偿函数, $A_1(s)$ 为主反射镜控制器模型函数, $C_2(s)$ 为从反射镜位置补偿函数, $A_2(s)$ 为从反射镜控制器模型函数。

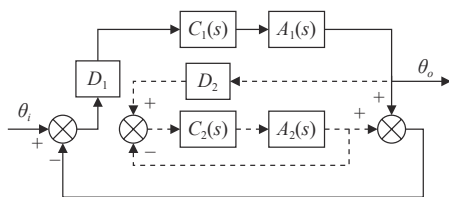


图 9 联动跟踪系统模型

Fig. 9 Linkage tracking system model

设主反射镜回路前向传递函数为:

$$G_1(s) = D_1 C_1(s) A_1(s), \quad (6)$$

从反射镜回路闭环传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{C_2(s) A_2(s)}{1 + C_2(s) A_2(s)}, \quad (7)$$

此时,整个系统闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)[1 + D_2 G_2(s)]}, \quad (8)$$

系统误差传递函数为:

$$e(s) = 1 - \Phi(s) = \frac{1 + G_1(s) D_2 G_2(s)}{1 + G_1(s)[1 + D_2 G_2(s)]}. \quad (9)$$

4.2 粗跟踪控制器设计

粗跟踪理论上属于采样伺服系统,其执行元件为直流伺服力矩电机,以方位轴为例,通过测试得到传递函数为

$$G_m(s) = \frac{9.36}{(0.00028s + 1)(0.0707s + 1)}. \quad (10)$$

回路校正采取超前滞后形式,系统开环频率特性曲线的低频部分按照 $-40 \text{ dB}/10$ 频段快速衰减,以压缩带宽并提高增益,在中频部分以 $-20 \text{ dB}/10$ 频段穿过 0 dB 处,保证系统稳定,并在过零后以较大斜率快速衰减,滤除高频干扰。其中,电机速度回路校正为零型系统。经测试,系统机械谐振频率为 400 Hz ,速度回路带宽按照谐振频率的 $1/5$ 设计,校正后的速度回路开环传递函数为:

$$G_v(s) = \frac{1000(0.017s + 1)}{(0.76s + 1)(0.0016s + 1)(0.0707s + 1)(0.00028s + 1)}. \quad (11)$$

由于各跟踪单元的电机特性一致,此时电机速度回路闭环模型为:

$$A_1(s) = A_2(s) = \frac{G_v(s)}{1 + G_v(s)} \approx \frac{1}{(0.002s + 1)^2}. \quad (12)$$

在设计回路补偿装置时,需要考虑各回路间的差异。主回路为光闭环跟踪,回路带宽受到相机帧频及数据处理传输延时等因素限制,为保证系统稳定,回路带宽不宜过高。而从回路为数引跟踪,可以通过提高控制器的采样速率、减小执行周期,来减小回路相位损失,进而做到更高的伺服带宽。此外,较低的主回路带宽还可以更好地将目标运动的高频分量滤除,提高从回路联动精度,因此,为了得到更好的双镜联动跟踪性能,选择将主从回路位置带宽拉开较大距离。

采样伺服系统的回路带宽一般小于采样频率的 $1/10$ 。本系统中粗跟踪相机的帧频为 100 Hz ,主回路伺服带宽按照相机帧频的 $1/20$ 进行设计,从回路控制器采样频率为 1 kHz ,速度环带宽为 80 Hz ,本文从回路带宽按照速度环带宽的 $1/3$ 进行设计。

通过仿真知,为确保跟踪精度,设置最大角速度 $\Omega_{\max} = 8 \text{ mrad/s}$,最大角加速度 $\varepsilon_{\max} = 3 \text{ mrad/s}^2$,由此可得到此时的等效正弦幅值 $A = \frac{\Omega_{\max}^2}{\varepsilon_{\max}} = \frac{8^2}{3} = 0.022 \text{ rad}$,频率为 $\omega = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega_{\max}} = \frac{3}{8} = 0.38 \text{ s}^{-1}$ 。对于复合轴跟踪系统,粗跟踪精度由精跟踪视场决定,本系统精跟踪视场为 $600 \mu\text{rad}$,取粗跟踪精度为精跟踪视场的 $1/3$,则大小为 $\pm 100 \mu\text{rad}$,联动跟踪精度由前文链路能量分析给出,大小为 $\pm 26 \mu\text{rad}$ 。

根据伺服系统的精度需求及校正原则, 将位置回路按照一型系统校正, 回路补偿函数为:

$$\begin{cases} C_1(s) = \frac{600(0.16s + 1)}{(0.00796s + 1)(4.8s + 1)} \\ C_2(s) = \frac{1500(0.16s + 1)}{(2.63s + 1)(0.0032s + 1)} \end{cases}, \quad (13)$$

其中: $C_1(s)$ 为主镜回路补偿函数, $C_2(s)$ 为从镜回路补偿函数。对系统进行仿真得到主从回路闭环特性如图 10 所示, 主从回路的位置伺服带宽分别为 $B_{p1} = 5.2 \text{ Hz}$, $B_{p2} = 26.5 \text{ Hz}$ 。

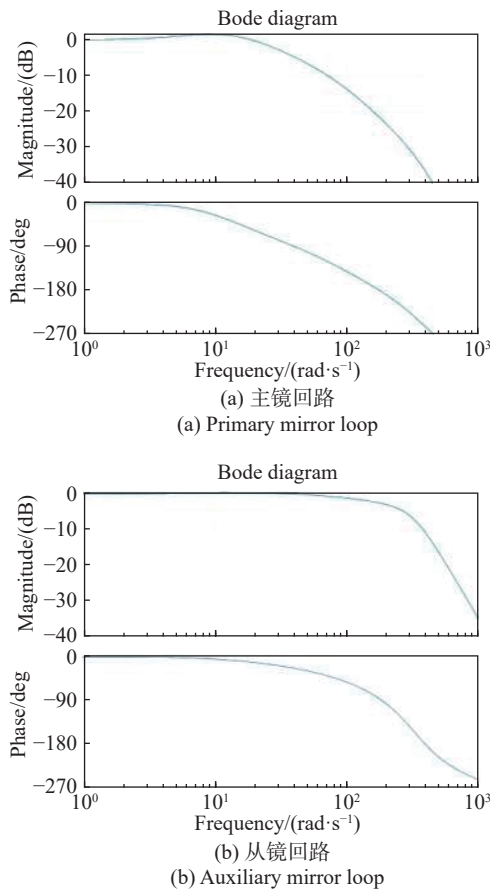


图 10 位置环频率特性

Fig. 10 Frequency characteristics of position loop

5 双镜联动粗跟踪实验

为了验证联动跟踪方案的实际跟踪性能, 搭建了实验系统, 在室内环境下对粗跟踪系统的跟踪精度及双镜联动精度进行测试。如图 11 所示, 实验装置分为发射与接收两部分。发射端使用靶

标作为模拟目标源, 通过控制靶标旋转模拟从光端机运动, 其由激光器, 平行光管, 反射镜, 靶标控制器及上位机组成。接收端为主光端机粗跟踪系统, 由光学天线阵列、中继光学系统、分光系统、CCD 相机、粗跟踪伺服控制系统及上位机系统组成。

发射端的信标光与通信光为同轴发射, 其中信标激光器波长为 830 nm, 通信激光器波长为 1 550 nm。激光经 200 mm 平行光管整形后出射, 出射光束经位于靶标旋臂末端的反射镜偏转后指向接收端光学天线。靶标旋臂在电机带动下旋转, 产生等效正弦测试信号。

接收端光学天线中的每片反射镜作为一个独立伺服子单元, 选用雷尼绍公司的 26 位绝对式光栅编码器作为角度检测元件。粗跟踪相机探测视场为 4 mrad, CCD 相机像元角分辨率为 4 μrad, 帧频为 100 Hz。采用 STM32 芯片作为其核心控制器, 通过双线性变换将模拟补偿函数离散化, 经过编程实现数字化控制。上位机软件基于 Labview 环境编写, 所有子单元与粗跟踪伺服控制系统相连并通过 RS-422 串口实现与上位机通信, 由上位机进行统一操控。在接收端内部通过分光系统分离出子光路, 实现跟踪状态下的光功率实时监测。

为了实现反射镜同步, 实验开始前, 需要使用 CCD 相机对传感器初始偏差进行校准。方法是: 首先令靶标处于静止状态, 调整主反射镜光斑至 CCD 相机视场中心, 然后调整从反射镜, 使主从反射镜光斑重合, 此时两反射镜到达共面位置。通过读取编码器角度, 得到初始偏差为:

$$\varepsilon_0 = P_1 - P_2, \quad (14)$$

式中: P_1 为主镜编码器角度值, P_2 为从镜编码器角度值。跟踪过程中通过调整从镜使两编码器差值始终等于 ε_0 , 以保证反射镜同步转动。

实验中, 控制靶标旋转产生的最大角速度 Ω_{\max} 为 8 mrad/s, 最大角加速度 ε_{\max} 为 3 mrad/s² 的等效正弦信号, 并开启粗跟踪系统, 对靶标发出的信标光进行跟踪。图 12 为实验现场照片。

实验中系统工作状态稳定, 从图 12(b) 可以看出, 双镜光斑重合度较好, 近似为单光斑。通过上位机读取伺服系统状态数据, 绘制出光闭环粗跟踪误差及双镜联动误差曲线, 如图 13 所示。

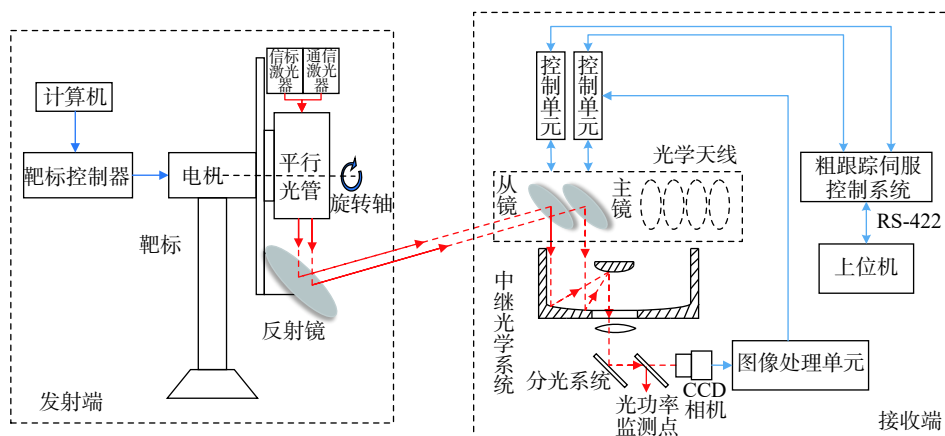
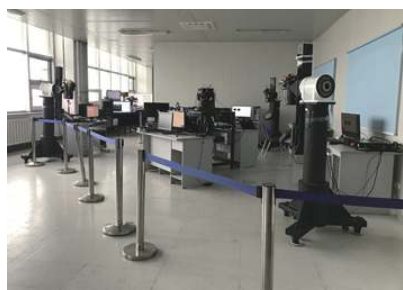
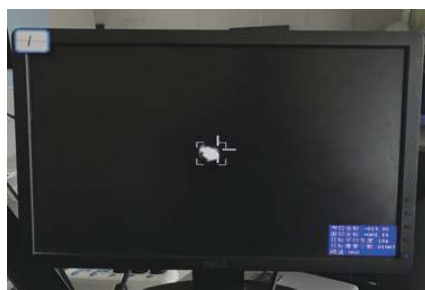


图 11 实验装置组成

Fig. 11 Configuration of the experimental system



(a) 实验装置
(a) Experimental device



(b) 粗跟踪光斑图像
(b) Spot image obtained by coarse tracking system

图 12 实验现场照片

Fig. 12 Photographs of experimental site

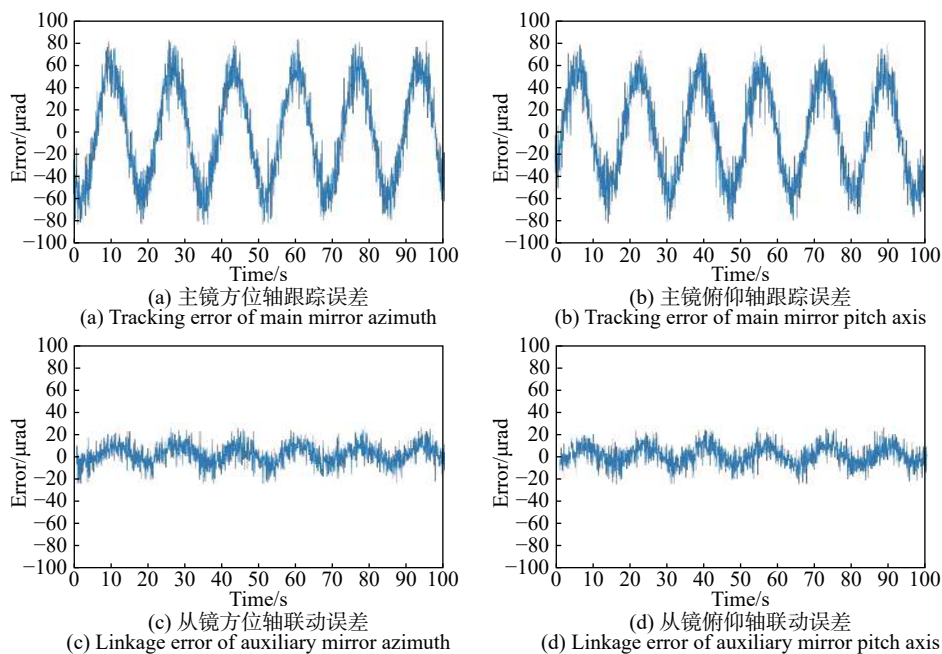


图 13 跟踪误差曲线

Fig. 13 Tracking error curves

图13中横轴为上位机数据采样时间点,采集频率为20 Hz,时间间隔为50 ms。纵轴为跟踪误差量,单位为 μrad 。其中,光闭环粗跟踪方位轴误差为 $82.1 \mu\text{rad}(3\sigma)$,俯仰轴误差为 $79.3 \mu\text{rad}(3\sigma)$,跟踪精度优于 $83 \mu\text{rad}$ 。双镜方位轴联动误差为 $25.8 \mu\text{rad}(3\sigma)$,俯仰轴联动误差为 $25.2 \mu\text{rad}(3\sigma)$,双镜联动精度优于 $26 \mu\text{rad}$,满足设计要求。

在所有条件不变的情况下,在接收端光功率监测点处使用光功率计对单镜与双镜两种不同跟踪方式下的接收通信光功率进行测试,结果如表1所示。

表1 接收端光功率测试结果

Tab. 1 Test results of optical power at the receiving end

跟踪方式	监测点平均光功率
单镜独立跟踪/dB	-24.6
双镜联动跟踪/dB	-21.9

通过对比可知,使用双镜跟踪方式相较于单镜跟踪,平均接收光功率可提高约2.7 dB,达到预

期设计效果。

6 结 论

本文对空间激光通信组网粗跟踪系统展开研究,提出了基于反射镜拼接光学天线的多目标跟踪架构,通过使用双镜联动的跟踪控制方案,提高了光信号能量利用率,通过建立完整的联动跟踪模型,对控制器进行设计,得到系统主从回路伺服带宽分别为5.2 Hz, 26.5 Hz。在此基础上,通过搭建实验装置,在室内进行了粗跟踪技术验证。结果显示,本文系统能够对目标实现稳定跟踪,跟踪精度优于 $83 \mu\text{rad}$,双镜联动精度优于 $26 \mu\text{rad}$,系统平均接收光功率提高约2.7 dB。实验验证了反射镜联动跟踪技术的可行性,提高了系统光能量利用率,实验结果符合预期,满足空间激光通信粗跟踪系统性能要求,为建立空间多节点间高速光信息网络奠定了基础。

参考文献:

- [1] 高铎瑞,李天伦,孙悦,等.空间激光通信最新进展与发展趋势[J].中国光学,2018,11(6):901-913.
GAO D R, LI T L, SUN Y, et al.. Latest developments and trends of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [2] 任建迎,孙华燕,张来线,等.空间激光通信发展现状及组网新方法[J].激光与红外,2019,49(2):143-150.
REN J Y, SUN H Y, ZHANG L X, et al.. Development status of space laser communication and new method of networking[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 143-150. (in Chinese)
- [3] 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.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, et al.. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
- [4] 李少辉,陈小梅,倪国强.高精度卫星激光通信地面验证系统[J].光学精密工程,2017,25(5):1149-1158.
LI SH H, CHEN X M, NI G Q. Highly precise ground certification system of satellite laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1149-1158. (in Chinese)
- [5] 姜会林,付强,赵义武,等.空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J].物联网学报,2019,3(2):1-8.
JIANG H L, FU Q, ZHAO Y W, et al.. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(2): 1-8. (in Chinese)
- [6] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等.机载激光通信系统发展现状及趋势[J].中国光学,2016,9(1):65-73.
ZENG F, GAO SH J, SAN X G, et al.. Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 65-73. (in Chinese)
- [7] 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.
YIN ZH ZH, CHEN J Y, ZHOU X W. Development and technology of U. S. military satellite communications systems[J]. *Communications Technology*, 2009, 42(11): 55-58. (in Chinese)
- [8] 吴应明,刘兴,罗广军,等.空间光通信网络技术的研究进展及架构体系[J].光通信技术,2017,41(11):46-49.
WU Y M, LIU X, LUO G J, et al.. Research progress and structure system of space optical communication network

- technology[J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(11): 46-49. (in Chinese)
- [9] 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.
YU X N, TONG SH F, DONG Y, *et al.*. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3348-3353. (in Chinese)
- [10] 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.
JIANG H L, JIANG L, SONG Y S, *et al.*. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405008. (in Chinese)
- [11] 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.
JIANG H L, HU Y, DING Y, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006003. (in Chinese)
- [12] 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]. 航天遥感与返回, 2011, 32(5): 52-59.
JIANG H L, HU Y, SONG Y S, *et al.*. Research on space laser communication network[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 52-59. (in Chinese)
- [13] 张雅琳, 安岩, 王超, 等. 空间激光通信组网中旋转抛物面基底面型研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0706003.
ZHANG Y L, AN Y, WANG CH, *et al.*. Research on rotating paraboloid based surface in space laser communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0706003. (in Chinese)
- [14] 姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 9-22.
JIANG H L, TONG SH F, ZHANG L ZH, *et al.*. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 9-22. (in Chinese)

作者简介:



王俊尧(1994—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事空间激光通信系统伺服控制方面的研究。E-mail: wangjy2001@126.com



宋延嵩(1983—),男,吉林长春人,硕士生导师,主要从事空间激光通信系统光束伺服、光电跟踪和光电测试方面的研究。E-mail: songyansong2006@126.com