

激光与光电子学进展

空间激光通信组网反射镜跟踪性能

赵佰秋^{1,2,3}, 于笑楠^{1,2*}, 董岩^{1,2}, 张立中^{1,2}, 佟首峰^{1,2}¹长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;²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;³长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对空间激光通信组网各网络拓扑节点高度动态、通信链路搭建困难的问题,在现有“一点对多点”组网光学原理基础上,对其反射镜光学天线伺服性能进行研究。通过实验对针对反射镜的基于位置环和基于速度环的两种不同的光闭环控制策略进行对比,结果显示:基于速度环的光闭环策略在跟踪换向时会出现瞬间较大误差抖动,而基于位置环的光闭环策略的跟踪误差在换向时更加平稳,且误差较小。利用Matlab平台进行了基于速度环的光闭环跟踪仿真,仿真得到的跟踪误差与实际跟踪误差基本一致,但并无较大的换向误差。结合低速启动实验,得出结论:该误差来源于速度环较差的低速启动性能,通过增加位置环降低换向跟踪误差的方案适用于轴系谐振频率较高的光机系统。实验还对位置环跟踪下的速度前馈进行了研究,结果表明:前馈增益从0到2递增时,位置跟踪误差先减小后增大,跟踪误差最小值出现在增益值为0.95~1.05附近。

关键词 光通信; 空间激光通信组网; 反射镜; 光闭环性能; 速度前馈

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906007

Tracking Performance of Mirrors in Space Laser
Communication NetworkingZhao Baiqiu^{1,2,3}, Yu Xiaonan^{1,2*}, Dong Yan^{1,2}, Zhang Lizhong^{1,2}, Tong Shoufeng^{1,2}¹National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;²National Defense Key Discipline Laboratory of Open Space Laser Communication Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;³Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the problems of high dynamic topology nodes and difficult communication link construction in space laser communication networking, based on the existing "one point to many points" networking optical principle, the servo performance of its mirror optical antenna is studied. Two different optical closed-loop control strategies based on the position loop and speed loop are compared through experiments. The results show that the optical closed-loop control strategy based on the speed loop will have large instantaneous jitter of tracking and reversing errors, while the optical closed-loop control strategy based on the position loop is more stable and has small error when reversing. The optical closed-loop tracking simulation based on the speed loop is carried out by using the Matlab platform. The tracking error obtained by the simulation is basically consistent with the actual tracking error, but there is no large reversing error. By combining with the low-speed

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-09-30; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91838301)

*E-mail: yuxiaonan1989@126.com;

start-up experiment, we concluded that the error comes from the poor low-speed start-up performance of the speed loop, and the scheme of reducing the reversing and tracking errors by adding the position loop is suitable for the optical mechanical system with high resonance frequency of the shafting. The experiment also studied the velocity feedforward of position loop tracking. The results show that when the feedforward gain increases from 0 to 2, the position tracking error first decreases and then increases, and the minimum tracking error appears near the gain value of 0.95-1.05.

Key words optical communications; space laser communication networking; mirror; optical closed-loop performance; speed feedforward

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.3310

1 引言

空间激光通信具有通信速率高、通信容量大、信息安全性强、不需要频段许可等特点,随着通信需求的不断增长,其在一些特定使用条件(如星间链路、星地下行链路等条件)下凸显出了独特的优势^[1-4]。但相较于无线电磁通信,利用激光通信实现信息网络化较为困难,具体体现在网络拓扑高度动态,如星间成员节点在不同轨道上高速运行、航天航空等飞行器都具有较强的机动性,这造成网络拓扑实时改变,从而对光端机的跟踪性能提出了更高的要求^[5-9]。

2012年10月长春理工大学姜会林团队提出了空间激光通信组网方案。文献[10]论述了组网的光学原理,并提出以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构的 光学天线、中继光学系统等,为“一点对多点”同时激光通信提供了可行的光学方案。文献[11]研究了“一点对多点”激光通信组网光束跟踪子系统,采用经典比例积分微分(PID)控制与前馈相结合的控制算法,对最大速度为 1(°)/s、最大加速度为 1(°)/s²的正弦模拟目标源进行跟踪实验,跟踪误差 3σ ≈ 136 μrad,该研究为多光束伺服打下了基础。文献[12]是以单光束跟踪

为基础的多光束伺服研究,其着重阐述了连续跟踪、反射镜拼接的实现方法,最终实现了室内 360°全向执行、拼接成功率大于 90%的技术指标。为提高光学天线的利用效率,文献[13]展开了对反射镜联动控制的研究,即基于单探测器的多执行器联动跟踪,实验表明双镜跟踪方式相较于单镜跟踪方式的平均接收光功率可提高约 2.7 dB,这验证了联动控制的可行性。

目前“一点对多点”激光通信组网方案是实现激光通信网络化较为理想的方案。本文在前人研究的基础上,对方案中的反射镜天线伺服性能进行研究。首先对基于速度环的光闭环性能和基于位置环的光闭环性能进行对比与仿真,随后分别对两种方案的低速启动性能进行了测试,最后对稳定性能更优的位置闭环速度前馈增益进行了测试,分析了在不同速度前馈增益下的跟踪误差变化趋势。

2 激光通信组网方案

2.1 “一点对多点”主光端机工作原理

“一点对多点”组网激光通信主光端机原理图与三维图如图 1 所示。光学天线以旋转抛物面为基底,由多反射镜拼接粗指向机构,旋转抛物面具有

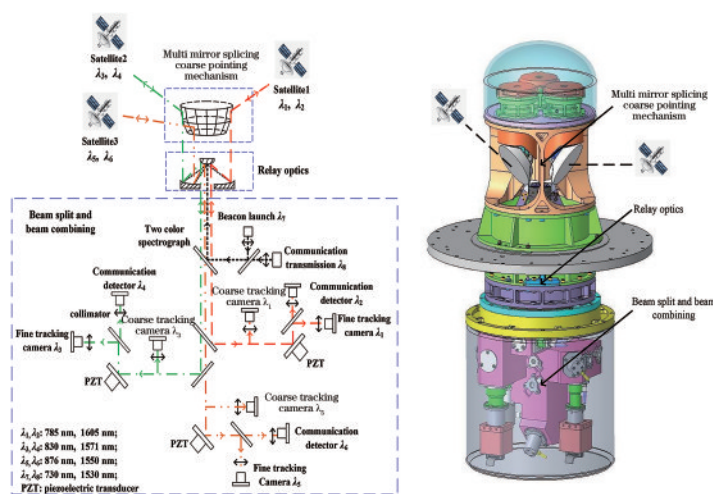


图 1 组网激光通信主光端机原理图与三维图

Fig. 1 Schematic diagram and three-dimensional diagram of main optical terminal of networking laser communication

入射光线通过焦点时反射光线与抛物面旋转对称轴平行的光学特性^[14]。中继光学系统采用卡塞格林结构,主镜为抛物面,次镜为双曲面结构,可对光学天线传出的平行光进行缩束^[15]。分光合束系统采用双色分光片,对发射、接收信号光进行分光与合束。通信收发系统针对不同的通信目标发出不同波长的光,由不同探测器分别探测多点信号,从而实现多点通信。由二维平面反射镜拼接的光学天线加快速倾斜压电陶瓷(PZT)振镜的复合轴 ATP (acquisition, tracking, pointing) 伺服系统,可以实现同时对方位角为 360°、俯仰角为 ±10° 范围内的三个模拟网络拓扑节点进行稳定跟瞄,从而保障通信链

路的视轴稳定。

2.2 伺服分系统

伺服分系统如图 2 所示。主控制器由 ARM 和现场可编程门阵列(FPGA)组成。利用 FPGA 的并行处理采集功能,分别实现相机脱靶量采集、惯导数据读取、编码器信息采集。ARM 通过 FSMC 总线定时对 FPGA 内的数据进行读取,进行算法计算,该架构可提高主控制器的单次处理周期。俯仰、方位轴电机驱动器均采用以色列 ELMO 驱动器,该驱动器具有电机参数识别与自整定电流环功能,可将永磁同步电机(PMSM)的驱动过程简化,通过外部逻辑电平直接驱动电机的电流环。

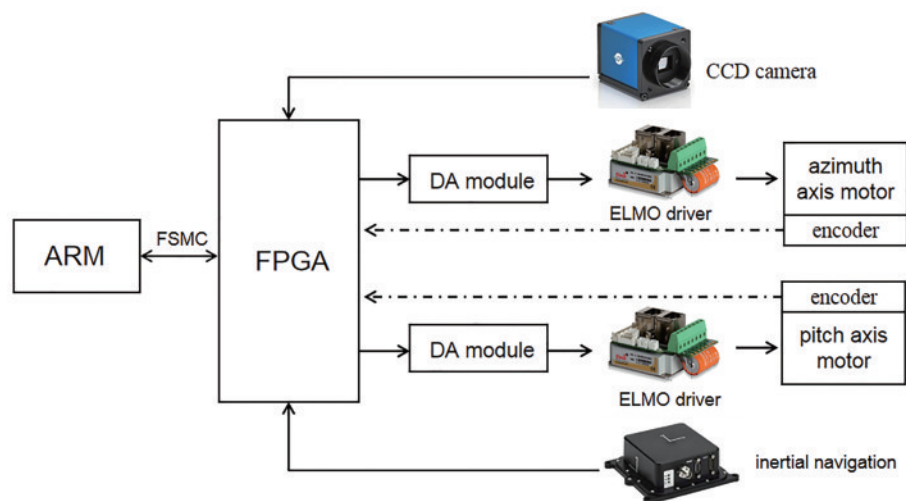


图 2 伺服分系统组成

Fig. 2 Composition of servo subsystem

俯仰轴回路与方位轴回路系统特性基本一致,此处仅以方位轴回路为例进行说明。通过频率特性分析法对单反镜系统方位轴进行补偿校正,并采用位置-速度-电流三闭环控制结构。多闭环控制系统遵循从内环到外环的设计方法,逐环设计调节器。单反镜控制对象一般可用双惯性环节表示,两个时间常数分别为电气时间常数与机械时间常数。其他环节如电力电子变换器的滞后环节、电流与转速检测的滤波环节等都处于频率特性的高频段,可将这两个常数进行等效处理。电流闭环后,原来双惯性环节的电流环控制对象经闭环控制后,可以近似等效成只有一个较小时间常数的一阶惯性环节。为保证电流环对电源与电路干扰具有一定的抑制作用,最终设计实测电流环的闭环带宽为 613 Hz。在设计速度环时,将电流环简化为速度环的一部分,为保证速度环无静态误差,需在校正环

节中加入一个积分环节,而电流环到速度环自带一个积分环节,此时速度环的开环传递已具有两个积分环节,则速度环校正目标应为典型 II 型系统,采用 PI 校正,速度环带宽为 96 Hz^[16]。位置环校正与速度环校正相似,依然是将速度环简化为位置环的一部分,位置环带宽为 22 Hz^[17]。这种从内环到外环的逐环设计方法,可以保证各环的稳定性,进而保证系统的稳定性,但同时也存在弊端,即从内环到外环的截止频率依次降低,瞬态响应速度变慢,因为在设计外环时,需要将内环等效为外环的一部分,这种等效成立的前提就是外环的截止频率远低于内环^[18]。

3 光闭环性能

3.1 光闭环策略性能对比

光闭环作为光电跟踪控制系统的最外环,其性

能直接决定了系统的跟踪能力。光闭环的内环构建通常有两种方式,分别为速度环作为内环的光闭环(图 3,依次为光闭环、速度环、电流环)和位置环作为内环的光闭环(图 4,依次为光闭环、位置环、速度环、电流环)。对两种光闭环形式的跟踪性能进

行检验,将光端机置于六轴摇摆台上,对六轴摇摆台偏航轴施加偏航角为 5° 、频率为 0.2 Hz 的正弦扰动,其对应的等效最大速度为 $6.28\text{ (}^\circ\text{)/s}$,等效最大加速度为 $7.89\text{ (}^\circ\text{)/s}^2$,等效正弦对应关系如图 5 所示。

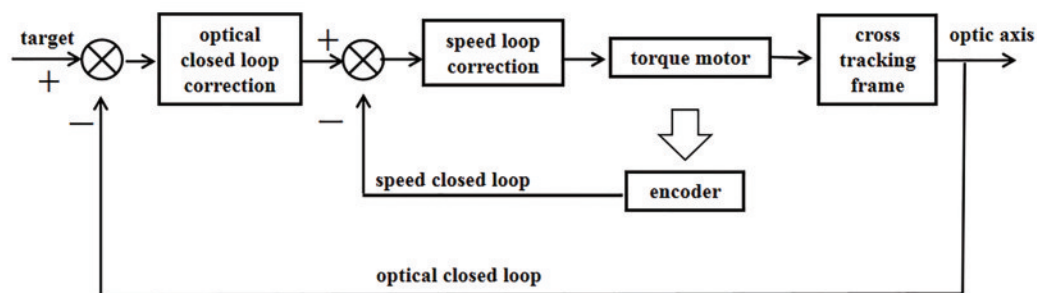


图 3 速度环作为内环的光闭环

Fig. 3 Optical closed loop with velocity loop as inner loop

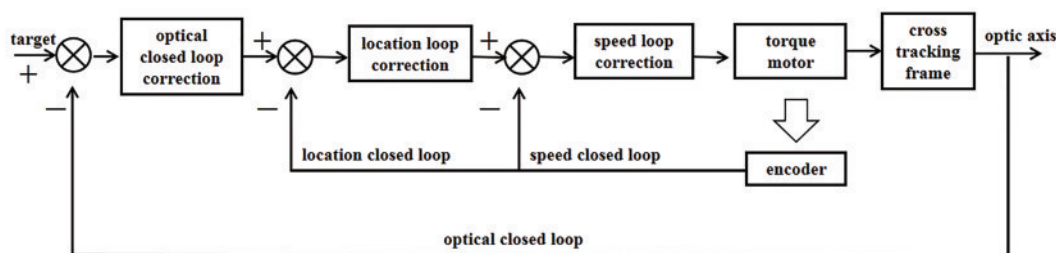


图 4 位置环作为内环的光闭环

Fig. 4 Optical closed loop with position loop as inner loop

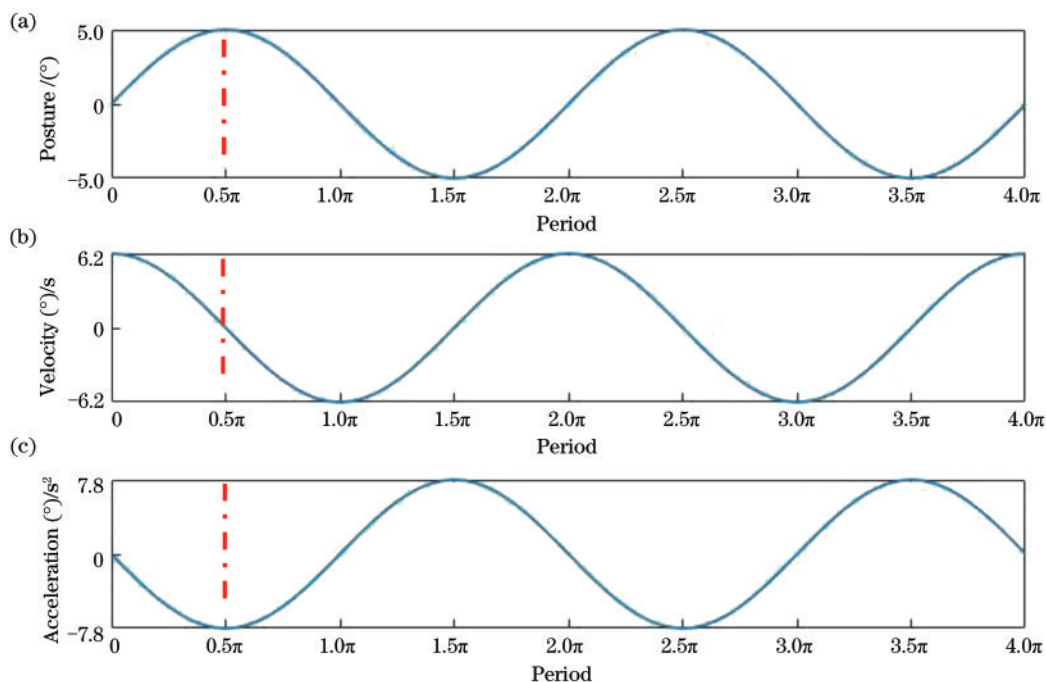


图 5 六轴摇摆台姿态、速度、加速度对应曲线。(a)姿态;(b)速度;(c)加速度

Fig. 5 Posture, velocity, and acceleration curves of six axis swing table. (a) Posture; (b) velocity; (c) acceleration

光端机利用反射镜的方位轴偏摆对位于正前方的模拟光源目标进行跟踪。两种光闭环跟踪脱靶量误差曲线如图 6 所示。

通过图 6 可以看出,基于速度环的光闭环脱靶

量在六轴摇摆台正弦扰动换向时出现瞬间极大误差,误差峰峰值约为 $800 \mu\text{rad}$ 。基于位置环的光闭环脱靶量误差在换向时虽然同样出现抖动,但幅度相对较小,误差峰峰值约为 $200 \mu\text{rad}$ 。

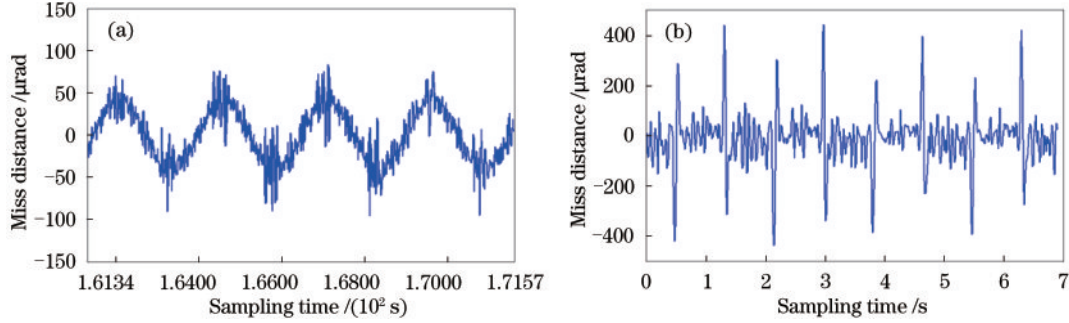


图 6 光闭环跟踪脱靶量。(a)基于位置环;(b)基于速度环

Fig. 6 Tracking miss distance obtained by optical closed loop. (a) Based on position loop; (b) based on speed loop

3.2 光闭环策略性能仿真

通过 Simulink 对基于速度环的跟踪脱靶量进行仿真,系统仿真框图与仿真结果如图 7 所示,图中 K 为增益, $1/s$ 为积分环节; LPF 为低通滤波环节。通过 Sin wave 正弦输入曲线模拟由摇摆台扰动引起的目标光源正弦运动,将零阶保持器 (Zero-order hold) 的信号保持时间设置为 10 ms ,对应的 CCD 相机脱靶量输出频率为 100 Hz 。Gain 为光闭环的开环增益, Transfer fcn1 传递函数用于光闭环的二阶滞后超前校正, Transfer fcn2 传递函数作为低通滤

波器,由于前馈速度来源于惯导,信号具有一定的高频噪声。Transfer fcn3 传递函数用于振荡环节,利用振荡环节模拟单反镜的速度闭环环节。Integrator 积分环节是在将速度转换为位置的过程中引入的一个积分环节。Scope1 示波器 1 用来观测输出曲线, Scope2 示波器 2 用来观测误差曲线。通过 Simulink 对基于位置环的跟踪脱靶量进行仿真,系统仿真框图与仿真结果如图 8 所示。Gain2 为位置闭环的开环增益, Transfer fcn4 传递函数用于位置闭环的二阶滞后超前校正。

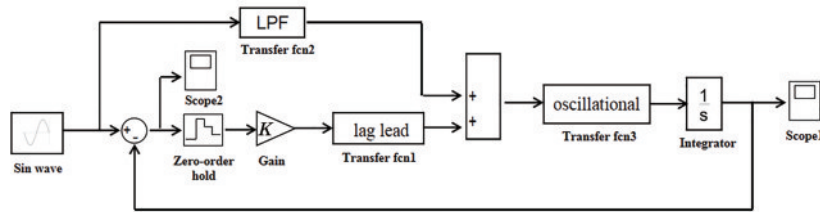


图 7 基于速度环的 Simulink 光闭环仿真框图

Fig. 7 Simulation block diagram of Simulink optical closed loop based on velocity loop

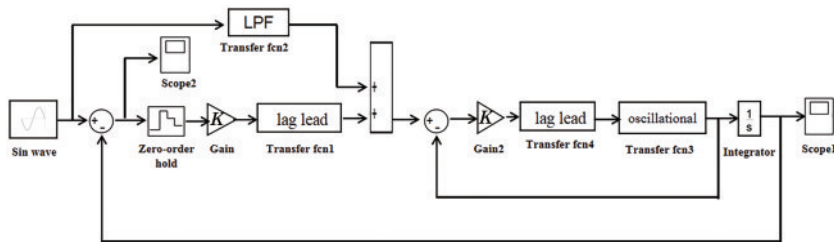


图 8 基于位置环的 Simulink 光闭环仿真框图

Fig. 8 Simulation block diagram of Simulink optical closed loop based on position loop

图 9 中仿真结果显示,基于速度环的光闭环稳态跟踪误差峰峰值约为 0.01° ,与实际实验跟踪误差

基本一致,但换向时未出现瞬间较大误差。基于位置环的光闭环稳态误差相比基于速度环的光闭环

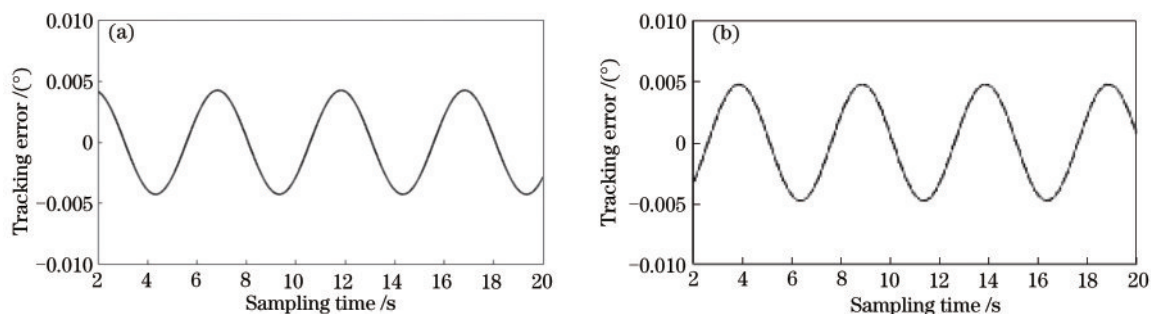


图 9 Simulink 光闭环跟踪脱靶量。(a)基于速度环;(b)基于位置环

Fig. 9 Tracking miss distance of Simulink optical closed loop. (a) Based on speed loop; (b) based on position loop

并没有明显下降趋势。

3.3 实验分析

当对六轴摇摆台偏航轴施加正弦扰动,换向时即偏航姿态最大处所对应速度为零,加速度处于最

大值。此时的电机跟踪运动状态可以等效为电机启动过程^[19]。通过实验测试得到的方位轴电机分别基于速度环和位置环低速启动过程的位置曲线如图 10 所示。

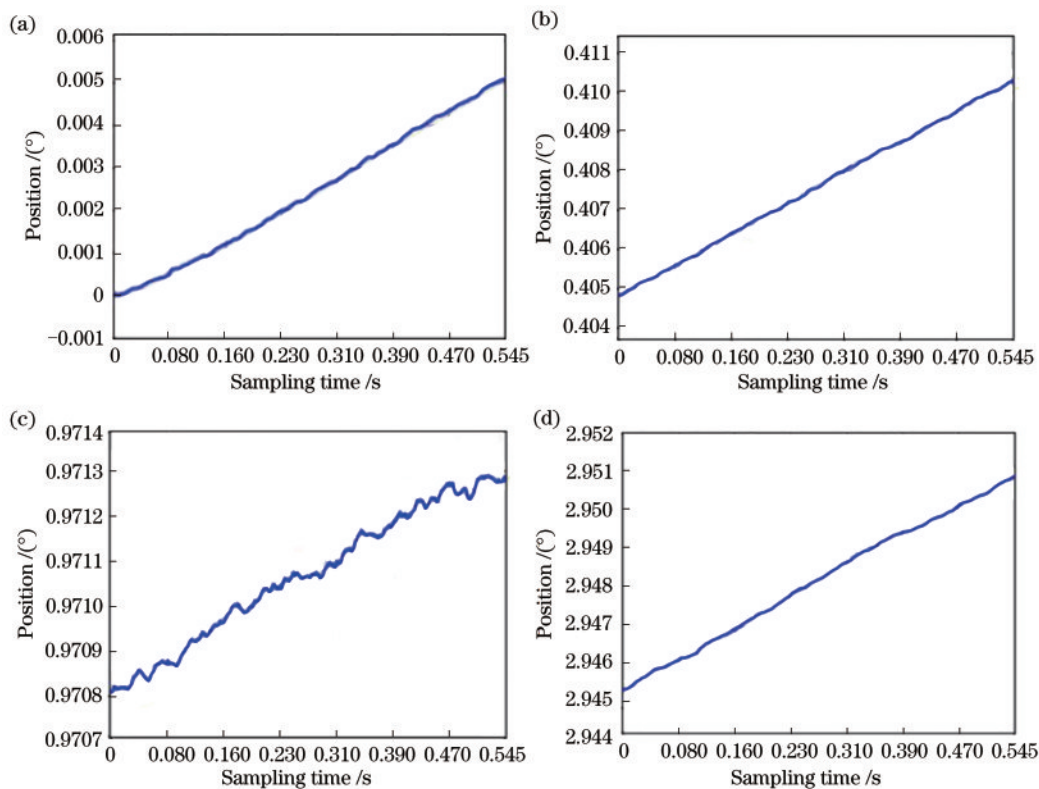


图 10 电机以速度为 $0.01 (^{\circ})/s$ 启动的位置曲线。(a)基于位置环的低速启动;(b)基于位置环的平稳运动;(c)基于速度环的低速启动;(d)基于速度环的平稳运动

Fig. 10 Position curves of motor starting at velocity of $0.01 (^{\circ})/s$. (a) Low speed starting based on position loop; (b) stable motion based on position loop; (c) low speed starting based on velocity loop; (d) stable motion based on velocity loop

图 10(a)是电机基于位置环以 $0.01 (^{\circ})/s$ 的速度启动的位置曲线,图 10(b)是位置环启动平稳后的位置曲线。图 10(c)是电机基于速度环以 $0.01 (^{\circ})/s$ 的速度启动的位置曲线,图 10(d)是速度环启动平稳后的位置曲线。通过对比两种启动模式后发现,位置环和速度环在运行平稳后的性能几

乎无差别,但位置环具有更好的低速启动性能。

通过以上实验不难看出,基于位置环的光闭环相较于基于速度环的光闭环具有更小的脱靶量误差,其原因在于位置环比速度环的低速启动性能更优,在跟踪换向时更加平稳。基于速度环的仿真未出现换向较大误差的原因是:仿真条件均

为理想状态,忽略了启动过程中的摩擦。基于位置环的光闭环脱靶量误差虽然较小,但脱靶量曲线仍具有明显的正弦包络,这证明基于位置环的光闭环的带宽较小。在速度环和光闭环中间增加一个位置环,导致最外环环路带宽进一步减小,所以基于速度环的光闭环伺服带宽更大,对正弦扰动的频率抑制效果更加明显。激光通信系统的伺服带宽主要受限于相机采样和轴系谐振频率,通过位置环提高换向跟踪精度的方案只适用于谐振频率较高的光端机系统。

4 前馈控制

前馈控制不需要等到输出量变化形成偏差才产生校正作用,而是与输入信号同时作用于控制系统,且不受系统延迟影响^[20]。前馈控制可以提升系统的动态性能、减小稳态误差,但如果前馈传递函数自身含有误差,则会将误差代入系统,造成输入偏差,所以前馈控制一般都是与反馈结合使用^[21]。

由 3.3 节的实验可知,基于位置环的光闭环性能更优。利用位置环对输入目标曲线进行跟踪实验,在原有的位置闭环环路基础上增加一个速度前馈支路。实验过程中,目标曲线采用两种方式:1)惯导检测六轴摇摆台姿态,输入源为惯导采集数据,将光端机置于六轴摇摆台上,摇摆台偏航轴做偏航角峰值为 5° 、频率为 0.2 Hz 的正弦往复运动,其他轴均静止不变,利用惯性导航器件采集摇摆台偏航姿态与偏航速度变化,通过反射镜的方位轴对姿态变化进行反向补偿,惯导输出的瞬时速度即为当前时刻的速度前馈量;2)模拟数引,惯导姿态与速度输出帧频均为 100 Hz ,为保证模拟数引与惯导采样输出一致,模拟数引计算式为

$$u = 5 \times \sin\left(\frac{n}{N} \cdot 2\pi\right), \quad (1)$$

式中: n 为采样计数,采样时间为 1 ms ; N 为周期采样总数,单周期采样个数为 5000 ; u 为模拟数引输出角度。数引模式下的速度前馈量通过差分获得。两种模式下的位置跟踪误差最大值随前馈增益数值变化的曲线如图 11 所示。

随着速度前馈增益不断增大,位置环跟踪误差先减小后增大。误差最小值在前馈系数为 $0.95 \sim 1.05$ 范围内。相同前馈增益下,跟踪惯导输出比跟踪模拟数引误差要稍大一些,其原因在于惯导检测六轴摇摆台姿态时具有一定检测误差和噪声,而模拟数引可认为是当前采样频率下的无噪声信号。

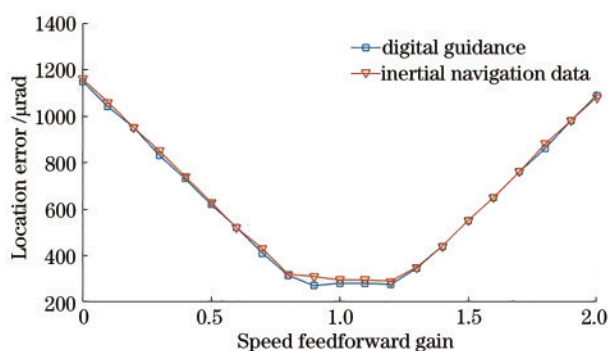


图 11 不同前馈增益下的跟踪误差

Fig. 11 Tracking error under different feedforward gains

5 结 论

针对空间激光通信组网困难的问题,对“一点对多点”组网光学原理中的反射镜光学天线伺服性能进行研究。实验结果表明,基于速度环的光闭环脱靶量在跟踪换向时出现瞬间极大误差,基于位置环的光闭环脱靶量误差在换向时更加平稳,且脱靶量误差更小。但基于速度环的光闭环伺服带宽更大,对扰动频率的抑制能力更强。同时,对基于位置环的光闭环跟踪的速度前馈进行了研究,结果表明前馈增益从 0 到 2 递增时,位置跟踪误差先减小后增大,跟踪误差最小值出现在增益值为 $0.95 \sim 1.05$ 范围内。

参 考 文 献

- [1] Jiang H L, An Y, Zhang Y L, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207-217. 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207-217.
- [2] Toyoshima M, Fuse T, Kolev D R, et al. Current status of research and development on space laser communications technologies and future plans in NICT[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [3] Wu W R, Chen M, Zhang Z, et al. Overview of deep space laser communication[J]. Science China Information Sciences, 2017, 61(4): 040301.
- [4] Sun J F. Development of laser communication system in space-ground integrated information network [J].

- Telecommunications Science, 2017, 33(12): 18-23.
孙建锋. 天地一体化信息网络激光通信系统发展设想[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 18-23.
- [5] Chen Q R, Yu X, Cui W N, et al. Visible-light communication and performance analysis based on medium- and short-distance inter-satellite links [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006003.
陈泉润, 虞翔, 崔文楠, 等. 基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006003.
- [6] 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.
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.
- [7] Bhasin K, Hayden J. Developing architectures and technologies for an evolvable NASA space communication infrastructure[C]//22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit 2004 (ICSSC), May 9-12, 2004, Monterey, California. Reston, Virginia: AIAA, 2004: 3253.
- [8] Malakooti B, Thomas I, Bhasin K, et al. A framework for an intelligent internet protocol for a space-based internet[C]//22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit 2004 (ICSSC), May 9-12, 2004, Monterey, California. Reston, Virginia: AIAA, 2004: 3226.
- [9] 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.
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.
- [10] 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.
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.
- [11] Yu X N, Tong S F, Dong Y, et al. Single beam tracking subsystem of space laser communication 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.
- [12] Yu X N, Tong S F, Jiang H L, et al. Multi-point laser communication optical relay antenna servo system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0914001.
于笑楠, 佟首峰, 姜会林, 等. 多点激光通信光学中继天线伺服系统[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0914001.
- [13] Wang J Y, Song Y S, Tong S F, et al. Linkage tracking control technology of space laser communication network mirror[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 537-546.
王俊尧, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 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.
- [14] Jiang L, Hu Y, Wang C, et al. Optical system in one-point to multi-point simultaneous space laser communications [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0506001.
江伦, 胡源, 王超, 等. 一对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506001.
- [15] Wang Y T, Yang S H, Li Z, et al. Design of compound free space optical/millimeter wave antenna for communication[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206001.
王一婷, 杨苏辉, 李卓, 等. 用于通信的自由空间光/毫米波复合天线设计[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206001.
- [16] Ma Y N, Lu Y J, Xu J, et al. Design of the visual axis stabilization system based on the speed and position double-closed loop control[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(3): 358-360, 364.
马铁男, 陆玉姣, 徐江, 等. 基于速度位置双闭环控制的视轴稳定系统设计[J]. 压电与声光, 2017, 39(3): 358-360, 364.
- [17] Zheng Z P, Wu H X, Wang L, et al. Overview of speed loop control technology for permanent magnet synchronous motor servo system [J]. Micromotors, 2017, 50(1): 91-96.
郑再平, 吴红星, 王璐, 等. 永磁同步电机伺服系统速度环控制技术[J]. 微电机, 2017, 50(1): 91-96.
- [18] Chen B S. Electric drive automatic control system: motion control system [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2003.
陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [19] Chen J. Study on the low velocity properties and jitter compensation for the servo system [D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
陈娟. 伺服系统低速特性与抖动补偿研究[D]. 长

- 春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.
- [20] Wang J L. Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets [D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.
王建立. 光电经纬仪电视跟踪、捕获快速运动目标技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- [21] Xiong W. Introduction to opto-electronic tracking and control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
熊伟. 光电跟踪控制系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.