

空间激光通信单探测器复合跟踪控制技术研究

张敏, 佟首峰, 滕云杰

(长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:空间激光通信终端伺服系统是一种高精度的跟踪机构,在扰动条件下,通信系统对跟踪系统的稳定性及精度提出了较高的要求。本文主要介绍了激光通信伺服系统的复合跟踪技术,详细论述了单探测器复合跟踪方式的选择以及激光通信伺服系统的控制流程。最后,在振动平台上进行了粗精复合的激光跟踪实验。实验结果显示,当通信终端系统跟踪最大振动加速度为 $0.22^\circ/\text{s}^2$ 的振动平台时,跟踪目标平稳性较好,单独采用粗跟踪时误差为 $60\ \mu\text{rad}$,采用粗精复合跟踪时位置误差可以达到 $2\ \mu\text{rad}$ 。实验结果表明,空间激光通信系统中单探测器复合跟踪技术的设计满足了系统跟踪精度的要求,为激光通信控制系统的设计提供了一定的参考。

关键词:激光通信;伺服控制;单探测器;复合跟踪

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.013

Research on single-sensor and multiple-axis tracking control system for spatial laser communication

ZHANG Min, TONG Shou-feng, TENG Yun-jie

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

Abstract: The servo system of spatial laser communication terminal is a kind of tracking mechanism with high precision. Under the disturbance condition, the communication system has higher requirements on the stability and accuracy of the tracking system. This paper mainly introduces the composite tracking technology of laser communication servo system, discusses the choice of single detector composite tracking mode and the control flow of laser communication servo system in detail. Finally, the laser tracking experiment of coarse and fine tracking was carried out on the vibration platform. Experimental results show that when the communication terminal system track the maximum vibration acceleration of $0.22^\circ/\text{s}^2$, the tracking stability is better, and the coarse tracking error is $60\ \mu\text{rad}$, and the position tracking error can reach $2\ \mu\text{rad}$ when the combination of coarse and fine tracking mode is used. Experimental results also show that the design of single detector compound tracking technology can meet the requirements of system tracking accuracy in the spatial laser communication system, and also provides some reference for the design of laser communication control system.

Key words: laser communication; servo control; single-sensor; multiple-axis tracking

1 引言

由于空间激光通信具有抗干扰能力强、传输速率高、保密性强、设备体积小和通信容量大等许多方面的优势,使其具有广泛的发展前景^[1-3]。但同时

也存在着结构设计精度、平台扰动、大气衰减等增加了通信系统精确对准难度的问题。指向、捕获、跟踪 (Pointing Acquisition Tracking, PAT)^[4]子系统就是为了解决上述问题而设计的, PAT 系统是实现空间

作者简介:张敏,女,博士,主要研究方向为空间激光通信伺服控制技术和无信标捕获技术。E-mail: 1297891415@qq.com

收稿日期:2018-12-18

激光通信的前提和保障,主要完成快速高概率的目标捕获以及动态条件下的高精度跟踪,是通信系统设计的重要组成部分^[5-8]。

在激光通信的复合轴控制技术中,主要采用高灵敏度和位置分辨率的 CCD 相机实现粗跟踪和精跟踪阶段的光斑脱靶量检测^[9-11],其中,粗跟踪伺服单元主要完成初始指向、开环捕获和粗跟踪任务,目的是将跟踪目标光束引入精跟踪视场,由切换到小视场的 CCD 完成光斑的高帧频检测,使用快速反射镜(Fast Steering Mirror,FSM)作为精跟踪执行机构完成跟踪,并由精跟踪决定 PAT 系统的最终跟踪精度^[12]。

本文主要研究空间激光通信的单探测器复合跟踪技术,对伺服控制系统的设计、工作原理、粗精复合跟踪技术的实现等内容进行了系统的研究,搭建了室内实验进行了技术验证和性能测试,借助振动平台产

生不同幅值与加速度的外部扰动,实际测试了通信终端的粗跟踪与复合跟踪精度两个性能指标。

2 激光通信伺服控制系统的设计

激光通信系统采用 ELMO 驱动器实现基于永磁同步电机的通信终端控制系统设计,伺服系统的结构如图 1 所示,从系统构成角度,组成部件包括机械转台结构、力矩电机、编码器、伺服控制器、驱动器等组成;从控制回路角度,系统有内部电流环、速度环和外部位置环组成。其中,电流环的作用的控制电机电流快速并无静差的跟随给定电流值,通常具有较高带宽,速度环的主要作用是控制终端结构的动态特性,提高系统的抗扰动能力,外部位置环则更加侧重于通信系统的位置粗跟踪精度,目的是为实现光闭环以及切换粗精跟踪,保证目标光束进入精跟踪视场。

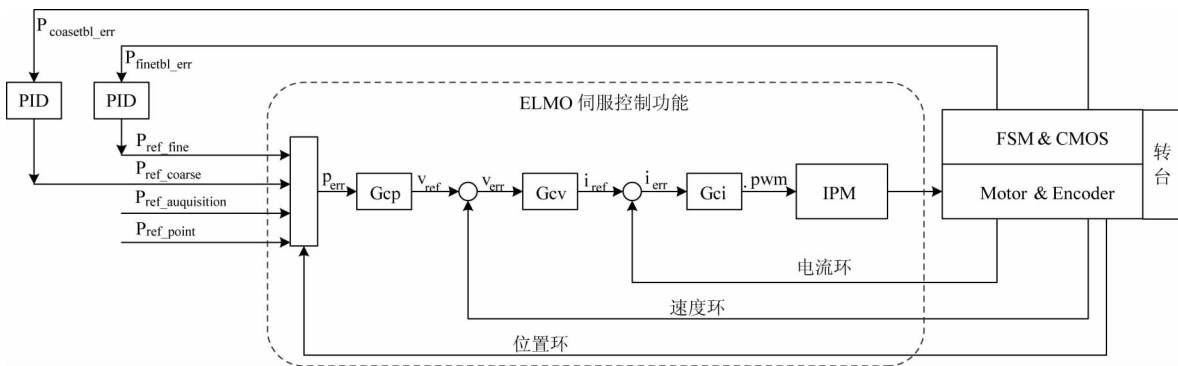


图 1 激光通信跟踪控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of tracking control system for laser communication

在激光通信中,PAT 系统的工作过程可以分为初始指向、快速捕获、粗跟踪、精跟踪四个主要阶段。初始指向过程将直接关系到系统捕获不确定区域的大小,这里,零位标校是指向过程的一项关键技术,即基准坐标与跟踪系统坐标在三维坐标系中的重合度。快速捕获是基于相应的捕获算法对不确定区域进行覆盖扫描,一旦发现目标光束伺服系统将自动切换到粗跟踪模式,并在稳定跟踪后进行相机切窗口,竟然精跟踪模式。通信系统的具体工作流程设计如图 2 所示。

3 单探测器复合跟踪技术的误差分析

复合跟踪测试实验将光端机安装在二维振动平台上,并在单端动态条件下完成对光管的出射光的跟踪。实验时给定振动幅值为 $0.1^\circ p-p$,最大加速度 $0.22^\circ/s^2$,如图 3 所示为振动平台的位置输出曲线。

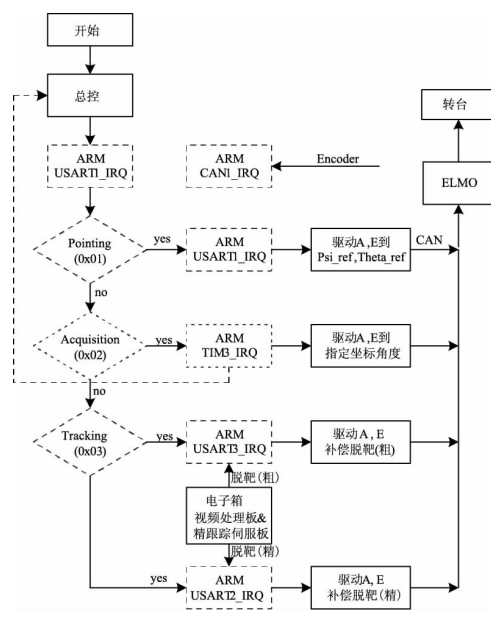


图 2 PAT 系统设计流程图

Fig. 2 The flow chart of PAT system

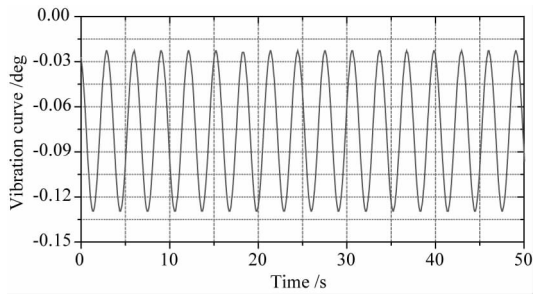


图3 振动平台的位置输出曲线

Fig. 3 The position output waveform of vibration platform

在粗跟踪模式下, CCD 相机采用全窗口 (1024 × 1024) 工作, 图像处理电路以 100 f/s 的速度记录光斑图像的粗跟踪位置脱靶量, 并反馈到粗跟踪伺服系统中, 通过计算控制量驱动转台实现光闭环。

控制系统的位置闭环带宽为 7 Hz, 在图 3 所示振动条件下, 采用转台粗跟踪系统对光斑进行动态粗跟踪时, 得到图 4 的转台位置跟踪曲线和粗跟踪误差曲线, PAT 系统的粗跟踪误差 < 60 μrad, 从而验证了粗跟踪伺服系统的跟踪稳定性。

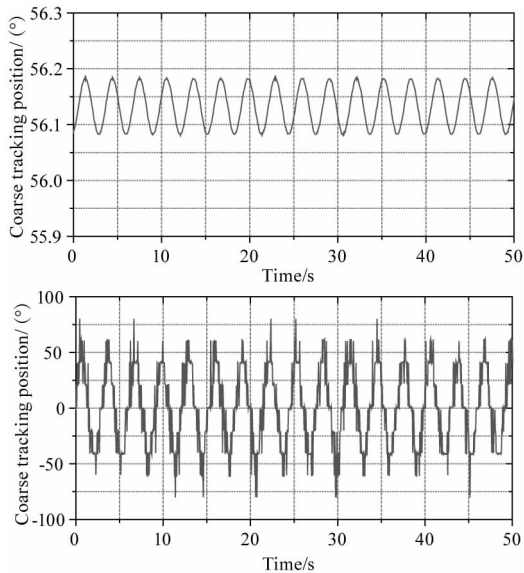


图4 粗跟踪位置曲线与跟踪精度

Fig. 4 The curves of coarse tracking position and tracking accuracy

在精跟踪模式下, 采用降低图像采集窗口大小以提高分辨率的方法, 将 CCD 相机从全窗口切换到精跟踪窗口 (80 × 80) 的模式进行工作, 图像处理电路以 2000 f/s 的速度记录光斑图像的精跟踪位置脱靶量, 通过脱靶量计算精跟踪振镜的工程量, 完成粗精复合跟踪。

在图 3 所示的振动条件下, 采用本文中提出的单探测器复合轴控制技术, 完成粗精复合跟踪。得到如图 5 所示的粗精复合跟踪的位置曲线, 包括通

信终端转台针对振镜的位置随动曲线, 基本保持在 0.1° 左右的正弦位置随动曲线, 以及振镜在精跟踪条件下的光闭环曲线, 其峰峰值为 225 μrad。

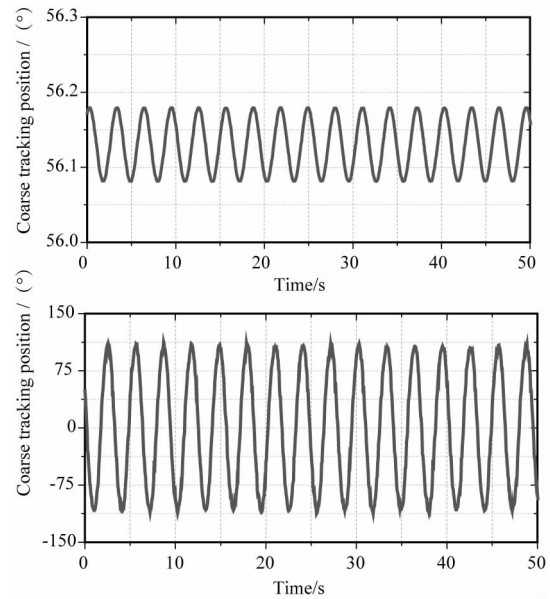


图5 粗精复合跟踪的位置曲线

Fig. 5 The position curves of the combination of coarse and fine tracking

基于上述 PAT 系统的设计以及粗精复合跟踪技术的应用, 在动平台上进行了激光通信终端伺服控制系统跟踪性能的测试实验。在单探测器复合跟踪技术的实验条件下, 最终得到了如图 6 所示的 PAT 系统的动态精跟踪误差, 即激光通信系统的跟踪误差 < 2 μrad。

通信转台的粗跟踪与精跟踪曲线说明了系统具有较好的动态响应能力, 其高精度的稳态跟踪也验证了控制系统的抗扰度能力。

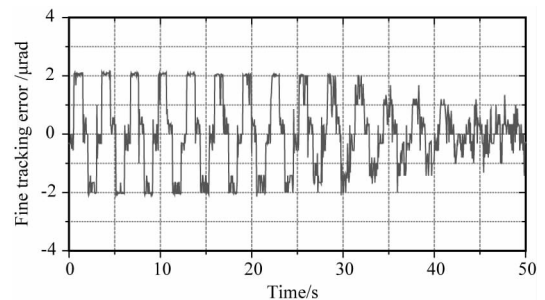


图6 复合跟踪条件下的精跟踪误差

Fig. 6 The fine tracking error based on the multiple-axis mode

4 结 论

结合以上激光通信控制系统的设计与复合跟踪实验验证, 在扰动平台作用下, 伺服机构采用单探测器设计以及粗精复合轴跟踪系统。实验结果显示, 当通信终端系统跟踪最大振动加速度为 0.22°/s²

的振动平台时,跟踪目标平稳性较好,单独采用粗跟踪时误差为 $60 \mu\text{rad}$,采用粗精复合跟踪时位置误差可以达到 $2 \mu\text{rad}$ 。实验结果表明,星载激光通信系统中单探测器复合跟踪技术的设计满足了系统跟踪精度的要求,为顺利完成激光通信提供了保障。

参考文献:

- [1] M Toyoshima, W R Leeb, H Kunimori. Comparison of microwave and light wave communication systems in space application[J]. Opt. Eng., 2007, 46(1): 015003.
- [2] J Wang, J Lv, G Zhao, and G Wang. Free-space laser communication system with rapid acquisition based on astronomical telescopes [J]. Opt. Express, 2015, 23(16): 20655 - 20657.
- [3] I S Ansari, F Yilmaz, M S. Alouini. Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems[J]. IEEE Wireless Commun. Lett, 2013, 2(13): 351 - 354.
- [4] LI Shihua, ZHOU Mingming, YU Xinghuo. Design and implementation of terminal sliding mode control method for PMSM speed regulation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1879 - 1891.
- [5] T Jono, et al. Acquisition, tracking, and pointing systems of OICETS for free space laser communications[J]. Proc. SPIE, 1999, 3692: 41 - 50.
- [6] LI Hongwen. Servo system of large telescope based on internal model PID control method[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 327 - 332. (in Chinese)
李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 327 - 332.
- [7] WANG Shuai, LI Hongwen, MENG Haoran, et al. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2442 - 2449. (in Chinese)
- [8] 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2442 - 2449.
- [9] Gawronski W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(2): 276 - 289.
- [10] ZHAO Xin, LIU Yunqing, TONG Shoufeng. Line-of sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 145 - 150. (in Chinese)
赵馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 145 - 150.
- [11] 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. (in Chinese)
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.
- [12] YU Xiaonan, TONG Shoufeng, DONG Yan, et al. Single beam tracking subsystem of space laser communication network[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3348 - 3353. (in Chinese)
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.
- [13] TONG Shoufeng, JIANG Huilin, LIU Yunqing, et al. Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(9): 16 - 20. (in Chinese)
佟首峰, 姜会林, 刘云清, 等. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. 光电工程, 2007, 34(9): 16 - 20.