

文章编号 1004-924X(2014)12-3348-06

空间激光通信组网单光束跟踪子系统

于笑楠¹, 佟首峰^{1*}, 董岩¹, 宋延嵩¹, 陆静¹, 杨涵²

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院微电子所, 北京 100010)

摘要:介绍了用于一对多激光通信组网控制系统的光斑跟踪闭环系统。在伺服转台位置闭环的基础上, 讨论以 CCD 相机为敏感器, 以二维伺服转台为执行器的光闭环系统。介绍了跟踪系统的数学原理, 研究了光闭环各环节的静态动态误差及开环闭环响应。在理论计算和数学仿真后, 编写了闭环跟踪程序。采用经典 PID 控制与前馈相结合的控制算法, 进一步提高了伺服带宽, 保证了系统的稳定性。对空间激光通信的光斑位置进行了跟踪试验, 结果显示跟踪误差为 $3\sigma \approx 136 \mu\text{rad}$, 基本符合空间激光通信组网系统激光束的指向要求。得到的结果验证了控制策略的可行性, 为多光束伺服打下了基础。

关键词:激光通信组网; 光束控制; 光闭环; 光斑跟踪

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3348

Single beam tracking subsystem of space laser communication network

YU Xiao-nan¹, TONG Shou-feng^{1*}, DONG Yan¹, SONG Yan-song¹, LU Jing¹, YANG Han²

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China)

* Corresponding author, E-mail: yuxiaonan1989@126.com

Abstract: A spot tracking closed-loop system for the control of a one-to-many laser communication net was introduced. On the basis of the closed-loop position of the servo rotary table, the closed-loop beam tracking system which takes a CCD camera as the sensor and a two-dimensional servo rotary table as the actuator was discussed particularly. The mathematical principle of the tracking system was introduced and static and dynamic errors of every link in the closed-loop beam system and the responses of open-loop and close-loop were researched also. After theoretical calculation and mathematical simulation, a closed-loop tracking programming was written. Then, a control algorithm combined the classical PID control and feedforward control was used to further improve the servo bandwidth and to guarantee the stability of the system. The tracking experiment on spot positions in laser communication was performed and the result shows that tracking error is $3\sigma \approx 136 \mu\text{rad}$, which meets the demands of laser pointing in laser communication nets. The obtained results verify the feasibility of control strategy, and lay the foundation for the multiple beam servo.

Key words: laser communication net; beam control; optical closed loop; spot tracking

收稿日期: 2013-12-27; 修订日期: 2014-02-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60907020)

1 引言

自由空间激光通信具有传输速率高,保密性好等优势,但面临快速捕获,精密跟踪等挑战,其正在成为通信与控制领域的研究热点。

目前对于点对点激光通信,国内外均进行了大量的研究与实验,其中,美国,欧空局在星间激光通信领域走在前列,相继实现了强度调制直接探测体制与相位调制相干探测体制下的星间激光通信^[1];在对准技术上,验证了信标光捕获的可靠性,并开拓了无信标捕获的新方向^[2]。国内激光通信技术起步较晚,但发展迅速,哈尔滨工业大学在海洋二号卫星平台上实现了我国首次星地激光通信,长春理工大学空间光电技术研究所地面-飞机,飞机-飞机等链路的激光通信上做了大量工作和验证性实验,积累了丰富的数据^[3]。

上述激光通信链路基本为点对点的激光通信,不具备通信组网能力,若要真正实现具有实用价值的激光通信体系,必须组建激光通信网络。目前,激光通信网络仍处于试验阶段,其构想为通过一对多反射镜伺服系统将多点光源发出的通信光束进行组合控制,从而实现多光束指向协调,建立激光束网络^[4]。

在组网激光通信系统中,已经实现了俯仰轴及方位轴电机的闭环控制,本文主要在已建立并调试完毕的电机闭环的基础上,论述多反射镜伺服系统中的单跟踪架光束控制子系统。文中首先讨论了跟踪系统的数学原理,然后搭建实验平台进行开环标定,最终完成闭环跟踪,得到精度数据。上述内容是多光束粗跟踪伺服的基础与前提,而粗跟踪伺服的作用是保证光束进入精跟踪探测器视场。拟选用的精跟踪视场约为 $200 \mu\text{rad}$,故粗跟踪需使光斑指向小于 $200 \mu\text{rad}$ ^[5]。

2 光束跟踪伺服控制系统架构

光束跟踪系统回路包括俯仰轴回路和方位轴回路,它们的系统特性基本一致,区别主要在于执行器参数。

俯仰轴执行器为直流力矩电机,其闭环伺服带宽为 34 Hz ,静态精度为 $15.68 \mu\text{rad}$;方位轴执行器为线性音圈电机,闭环伺服带宽为 200 Hz ,

执行精度为 $14.98 \mu\text{rad}$ ^[6]。

两回路的参数基本相同,故本文以方位轴为例,阐述光斑自动跟踪系统的回路特性。

方位轴光闭环跟踪系统结构图如图 1 所示。

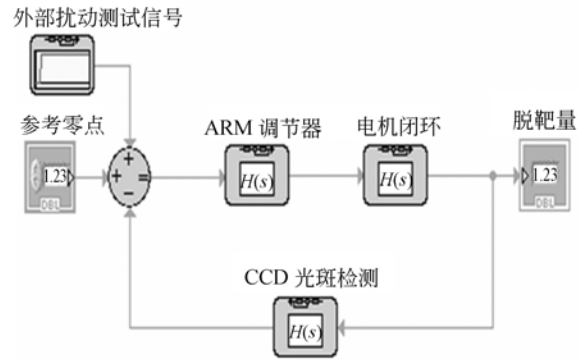


图 1 控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of control system

由图 1 可知,整个系统包括外部扰动测试信号,ARM 调节器,电机伺服闭环,CCD 光斑位置反馈等环节。光源采用 532 nm 的半导体激光器,工作电流为 1 A 。出射激光经过准直后,由二维摆镜控制指向,两个平行光管模拟空间激光通信平行光,对光束进行 16 倍放大后经过分光镜、执行器反射镜,最后进入探测 CCD 视场。

二维摆镜给出外部扰动测试信号,再由 PC 机的 DA 卡给出控制信号,该信号放大后,驱动二维伺服摆镜完成位置闭环控制,其摆动范围为 $\pm 22.5^\circ$ ^[7]。由摆镜控制激光束变换指向,产生相应的外部扰动或测试信号。

二维光束跟踪伺服转台以十字跟踪架结构为主,光斑位置检测使用帧频为 50 Hz 的 CCD,利用现场可编程门阵列(FPGA)对光斑进行解算,图像处理算法为质心及形心算法,即对于二维激光光斑,X 轴,Y 轴的质量矩分别为:

$$M_x = \sum_{k=1}^n x_k m_k, \quad (1)$$

$$M_y = \sum_{k=1}^n y_k m_k, \quad (2)$$

质量中心坐标为:

$$\bar{X} = \frac{\sum x_k m_k}{\sum m_k}, \quad (3)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum y_k m_k}{\sum m_k}, \quad (4)$$

实际跟踪误差为:

$$e_x = A_t^{-1} \iint x_s(x, y) dx dy, \quad (5)$$

$$e_y = A_t^{-1} \iint y_s(x, y) dy dx, \quad (6)$$

其中: x_k, y_k 分别为 X 轴与 Y 轴的坐标; n 为质元个数; m_k 为质量, A_t 为光斑面积^[8]。

通过上述质心算法得到光斑脱靶量,接着,将其经过 RS485 总线,传输至控制处理器,即图中的 ARM 调节器。ARM 调节器用于采集光斑脱靶量数据,以及提取相应坐标轴的脱靶量数据,进行运算后,生成的控制量作为电机闭环输入。电机闭环为一稳定位置环,由 ELMO 驱动器进行驱动^[9]。

光斑位置闭环控制采用前馈控制,即在闭环系统上增加一个开环支路,用以提供输入信号的微分(角速度,角加速度)。如图 1 所示。

其中:调节器:

$$G_1(s) = K_1, \quad (7)$$

电机回路:

$$G_2(s) = \frac{K_2}{s(T_1 s + 1)}, \quad (8)$$

电机与比例调节器单位反馈闭环的稳态误差为:

$$e_s(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} s G_2(s) G_1(s)} = \frac{1}{K_1 K_2}. \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可知,此系统存在静态误差,因此引入前馈方法进行调节:

前馈支路:

$$G_3(s) = K_3 s, \quad (10)$$

系统等效开环传递函数为:

$$G_0 = \frac{G_2(s) [G_1(s) + G_3(s)]}{1 - G_2(s) G_3(s)} = \frac{K_1 K_2 (1 + K_3 s / K_1)}{T_1 s^2}, \quad (11)$$

此时,系统稳态误差为:

$$e_s(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} s G_0(s)} = 0. \quad (12)$$

原系统回路为一阶系统,引入前馈后成为二阶系统,从而消除了速度滞后误差,在不影响系统稳定性的情况下,提高了跟踪精度。由于 CCD 仅能提供脱靶量信息,不能提供光斑运动速度与加速度信息,所以在光闭环中,使用速度滞后补偿的方法引入前馈具有较好的效果^[10]。

3 跟踪实验架构与各环节标定

光斑跟踪实验的总体结构如图 2 所示。

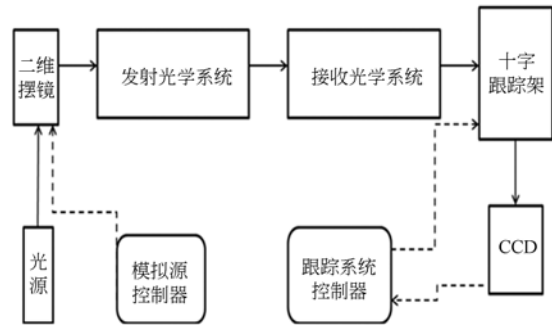


图 2 实验结构图

Fig. 2 Experimental structure diagram

图中,模拟源控制器控制二维摆镜,以实现光斑位置的运动控制,提供测试信号。激光器发出的光束经过二维摆镜偏转,再通过光学系统,到达十字跟踪架。之后,偏转至 CCD 相机,相机提取脱靶量来控制跟踪架实现光斑的二维跟踪。

为了评价系统性能,首先要对各环节进行开环标定。根据焦距与相机像元尺寸,得到相机每像元约为 $17 \mu\text{rad}$,目标模拟源的分辨率及跟踪架分辨率均独立确定。

3.1 模拟源标定

本实验首先对模拟激光位置的模拟源进行了标定,即给定模拟源阶跃信号,其幅值为 $0 \sim 1000$ 码值,得出如图 3 所示的响应曲线,可见系统稳态误差约为 4 pixel,上升时间小于 1 ms 。

目标模拟源的分辨率由二维摆镜转角传感器确定,约为 $1.13 \mu\text{rad}$ 。

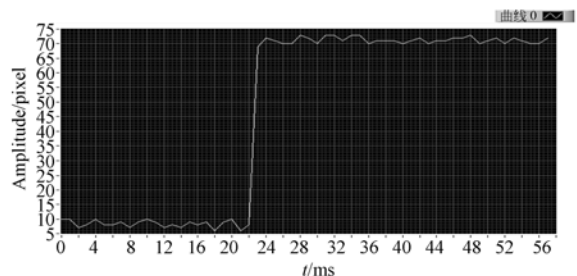


图 3 目标源开环测试

Fig. 3 Open-loop test of target source

3.2 跟踪伺服转台标定

令伺服转台按阶跃曲线运动,控制光斑进行

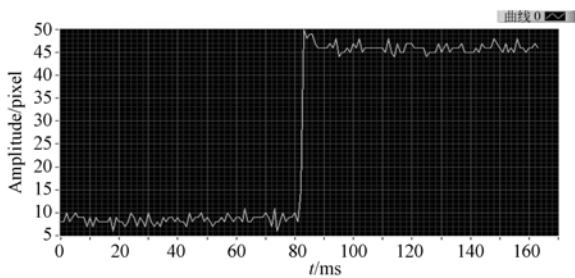


图 4 执行器开环测试

Fig. 4 Open-loop test of actuator

开环标定,幅值为 0~120 line。得出如图 4 所示的输出曲线,可见稳态误差约为 4 pixel,上升时间小于 1 ms。

跟踪伺服转台分辨率由方位轴伺服电机编码器分辨率给出,经测定为 5.3 μ rad。

4 跟踪程序设计与光闭环实验

4.1 光闭环跟踪程序结构

空间激光通信组网的伺服系统均采用数字化控制器,以 STM32 微控制器为核心控制器,构成光闭环的主要调节器。

所有硬件由系统软件进行管理,光闭环跟踪系统的软件由主程序、初始化子程序和中段服务子程序组成^[11]。

主程序完成主要完成初始化,监控等实时性要求不高的功能,主程序框图如图 5 所示。

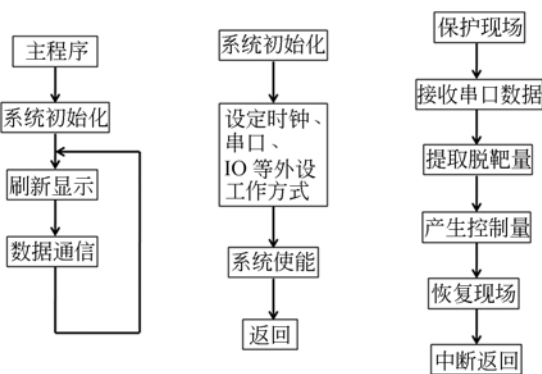


图 5 程序框图

Fig. 5 Block diagram of program

初始化子程序用于设定硬件工作方式、初始化系统参数及变量。初始化子程序框图。其中,系统时钟频率设定为 72 MHz,开串口接收中断,

波特率为 115 200^[12]。

中断服务函数主要用于实时性强的功能,在本实验系统中,主要用于读取 CCD 光斑脱靶量和产生控制命令。中断源为串口接收中断。其中 CCD 相机脱靶量数据长度为 8 byte,含帧头及求和校验;XY 轴数据均为 ± 512 pixel;相机帧频为 50 Hz,即控制循环更新的频率为 50 Hz。在一个循环周期内,按程序对脱靶量进行解析运算,最后产生控制命令,使能驱动器驱动电机,完成跟踪。

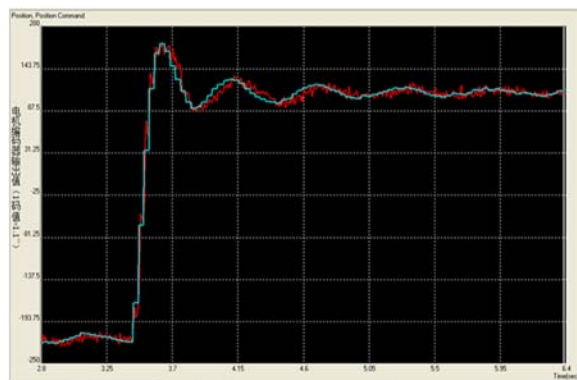


图 6 俯仰电机闭环跟踪曲线

Fig. 6 Closed-loop tracking curve of tilt motor

4.2 光闭环脱靶量阶跃响应

摆镜控制光斑走一阶跃曲线,幅值为 100 pixel,图 6(彩图见期刊电子版)为俯仰轴电机的闭环跟踪曲线,图中规整曲线(蓝色)为电机控制量,等效于光斑脱靶量;非规整曲线(红色)为实际电机运动位置。可见在光斑阶跃信号激励下,电机运动状态良好,电机控制量每 20 ms 更新一次,形成类似阶梯的规整锯齿形曲线,每个循环周期的控制量均加入了抗制动器饱和限制。从非规整实际运动曲线可以看出,电机位置闭环响应迅速,精度很高,从而保证了光闭环时的控制给定量与实际位置的误差符合要求。光闭环阶跃响应最终呈现为典型的衰减震荡曲线。

$$\text{超调量为 } M_p = \frac{h(t_p) - h(\infty)}{h(\infty)} \times 100\% =$$

21.1%,上升时间 $t_r = 40$ ms,峰值时间 $t_p = 120$ ms,调节时间 $t_s = 1$ s。

4.3 光闭环等效正弦跟踪误差

令目标模拟源给定一正弦信号,对俯仰轴进行跟踪实验,给定最大角速度为 $1(^{\circ})/s$,最大角加速度为 $1(^{\circ})/s^2$ 的等效正弦测试信号。得出实际

光斑位置与相机十字靶心的偏差,图 7 为光斑跟踪误差曲线,跟踪误差为 $3\sigma \approx 8 \text{ pixel} \approx 136 \mu\text{rad}$ 。

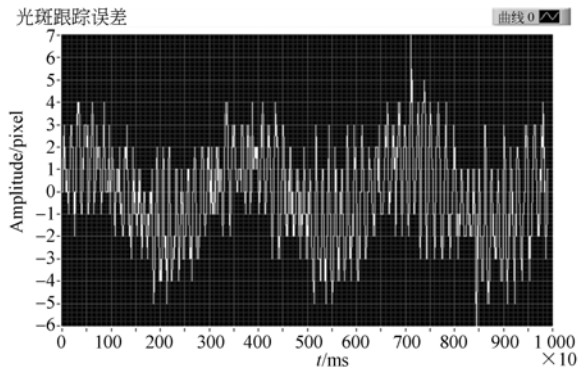


图 7 光斑跟踪误差

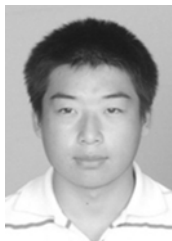
Fig. 7 Tracking error for spot

参考文献:

- [1] SODNIK Z. Free-space laser communication activities in Europe: SILEX and beyond [C]. *19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2006, LEOS 2006.
- [2] HINDMAN C, ROBERTSON L. Beaconless satellite laser acquisition - modeling and feasibility [J]. *Military Communications Conference, MILCOM 2004*, 1:41-47.
- [3] 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): 52-56.
- JIANG H L, HU Y, SONG Y S, *et al.*. Research on space laser communication network [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 52-56. (in Chinese)
- [4] 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.
- ZHANG CH, GU W B, LIU D, *et al.*. A pilot study of point-to-multipoint for satellite-to-earth optical communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 275-278. (in Chinese)
- [5] 赵馨, 佟首峰, 姜会林. 四象限探测器的特性测试 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2164-2169.
- ZHAO X, TONG SH F, JIANG H L. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2164-2169. (in Chinese)
- [6] 于笑楠, 佟首峰, 姜会林, 等. 激光通信组网控制系统 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(增刊): 183-189.
- YU X N, TONG SH F, JIANG H L, *et al.*. Control system of laser communication networking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (Supp.): 183-189. (in Chinese)
- [7] GALIARDI R M, KARP S. *Optical Communication Technology and Application* [M]. Translated by Chen Genxiang, Beijing: Electronic Industries Publishing Company, 1997, 323: 125-129. (in Chinese)
- [8] 王世峰, 赵馨, 佟首峰, 等. 自由空间光通信 APT 粗跟踪 CCD 相机的研制 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(5): 544-547.
- WANG SH F, ZHAO X, TONG SH F, *et al.*. APT coarse tracking CCD camera as free space laser

- communication [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29 (5):544-547. (in Chinese)
- [9] LI B C. A new computation of geometric moments [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(1):109-113.
- [10] 刘胜. 现代伺服系统设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2001.
- LIU SH. *The Design of Modern Servo System* [M]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001. (in Chinese)
- [11] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- CHEN B SH. *Automatic Control System of Electric Traction* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)
- [12] *Reference manual STM32F103xx advanced ARM-based 32-bit MCUs*[M]. STMicroelectronics
- [13] 李勇军, 赵尚弘, 李晓亮. 基于分层协议的卫星光网络组网研究[J]. 光通信技术, 2006, 4:43-44.
- LI Y J, ZHAO SH H, LI X L. Researching on dimensioning of optical satellite network based on layered protocol [J]. *Optical Communication Technology*, 2006, 4:43-44. (in Chinese)

作者简介:



于笑楠(1989—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事空间激光通信对准捕获跟踪技术的研究。E-mail: yuxiaonan1989@126.com

通讯作者:



佟首峰(1972—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,主要从事空间光学遥感及激光通信领域的研究。E-mail: tsf@cust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)