

星地链路激光通信载荷粗跟踪回路设计与验证

曲正, 佟首峰, 董岩, 于笑楠, 张敏

长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 针对地球同步中继卫星对地激光通信,设计了一种包含多重闭合回路的伺服跟踪系统,分析了跟踪算法的数学模型以及用于光斑脱靶量补偿的带执行器限位比例积分微分控制算法,介绍了星地链路激光通信跟踪系统中伺服闭环控制系统的组成、各执行模块的性能指标和工作模式,给出了伺服闭环系统和光闭环系统的工作原理。根据所设计的脱靶量提取算法和误差补偿算法,分别在图像处理模块和下位机执行模块中编写了光闭环跟踪程序。对整个系统进行静、动态环境下微弱信标光的跟踪实验测试,最终获得动态环境下 $\pm 20 \mu\text{rad}$ (3σ , σ 为标准差)、静态环境下 $\pm 7.5 \mu\text{rad}$ (3σ)的跟踪精度,实验结果验证了所设计跟踪回路的可行性及良好的操作性,结果表明该跟踪系统具有较高的跟踪精度。

关键词 光通信; 跟踪; 伺服闭环控制; 光闭环; 脱靶量

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070603

Design and Verification of Coarse Tracking Loop for Satellite Ground Link Laser Communication Load

Qu Zheng, Tong Shoufeng, Dong Yan, Yu Xiaonan, Zhang Min

*Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Aiming at the laser communication of geosynchronous relay satellite to earth, a servo tracking system with multiple closed loops is designed, and a mathematical model of the tracking algorithm and a proportional-integral-differential control algorithm with actuator limit for miss distance compensation of faculae are analyzed. Additionally, the composition of the servo closed-loop control system in the satellite-ground link laser communication tracking system, the performance index and work pattern of each execution module are introduced. The operating principle of the servo closed-loop system and the optical closed-loop system is explained. According to the design of the miss distance extraction algorithm and the error compensation algorithm, the optical closed-loop tracking programs in image processing module and slave machine execution module are carried out. The weak beacon tracking experiments for the whole system are carried out under static and dynamic environments, and the tracking accuracy of $\pm 20 \mu\text{rad}$ (3σ , σ is standard deviation) in dynamic environment and $\pm 7.5 \mu\text{rad}$ (3σ) in static environment are obtained. The experimental results verify the feasibility and the preferable operability of the design of tracking loop, and indicate that the designed tracking system has high tracking precision.

Key words optical communications; tracking; servo closed-loop control; optical closed-loop; miss distance

OCIS codes 060.2605; 150.5495

1 引言

激光通信系统具有高通信速率、强抗干扰能力和低功耗等优点,已逐渐成为实现空间通信的有效手

收稿日期: 2017-01-07; 收到修改稿日期: 2017-02-23

基金项目: 国家 863 计划(2012AA0017)

作者简介: 曲正(1994—),男,硕士研究生,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: qizi1994@126.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,博士,教授,博士生导师,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)

段^[1]。相较于射频通信,激光通信系统在轻量化和高速率上具有较大优势,在没有大气扰动的星间链路中具有巨大的发展潜力^[2]。激光通信系统具有带宽大和信息传输容量大的特点,可应用于地球同步中继通信卫星(GEO)^[3]。与此同时,激光通信束散角小,星间通信距离远,影响了光斑位置的信息提取和系统跟踪性能等^[4],一定程度上限制了空间激光通信的发展,因此提高系统工作时的动态跟踪精度具有重要意义。

指向捕获跟踪(PAT)分系统是空间激光通信系统的重要组成部分,是实现高动态、高精度通信的基础^[5]。从PAT分系统粗跟踪环节出发,设计了一种加载于GEO对地通信系统中的光端机跟踪系统,详细论述了单光束跟踪控制系统的设计方案,对用于控制星地链路通信光端机俯仰及方位转动的力矩电机进行参数整定,并介绍了光闭环脱靶量控制补偿算法。对光闭环回路进行优化设计,在高度简化系统复杂性、保证控制系统稳健性的前提下,最大程度地提高了星地通信系统的跟踪精度。

2 跟踪模型

对激光通信跟踪进行数学描述是分析星间激光通信系统工作执行状态的前提^[2]。由于需要搭建的光端机载体为GEO对地面近地面终端模拟通信系统,因此对系统光闭环回路跟踪环节进行建模分析。

2.1 波门跟踪算法

星地链路激光通信跟踪环节首先要通过计算得到系统接收信标光在光敏探测器的探测面上所形成的高斯光束光斑最终成像在接收屏中的位置^[6]。综合考虑系统复杂性、功耗、整合性以及响应速率等因素,选用互补金属氧化物半导体(CMOS)相机作为跟踪系统的光敏探测器。另外,考虑到算法的精度、普适性和复杂度,选用波门质心跟踪法作为CMOS确定目标位置的算法^[7]。

这里取 n 个光斑分布比较密集的离散单元,用质量 m_k 等价表征光斑中对应点 (x_k, y_k) 的像素亮度,则在 x 、 y 方向的质量矩 M_x 、 M_y 可分别表示为

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

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

质心在 x 、 y 方向的坐标分别为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k m_k}{\sum m_k}, \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k m_k}{\sum m_k}. \quad (4)$$

将(1)~(4)式中的 m_k 用坐标为 (x, y) 处的离散像素单元光强 s_k 替换,则(3)、(4)式等价于

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k s_k}{\sum m_k}, \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k s_k}{\sum m_k}. \quad (6)$$

通过上述分析可以看出,对于波门跟踪算法,只需获取视场中各离散像素光斑的能量及坐标,便可得到实时脱靶量,离散像素单元的光斑能量由光敏探测器来接收并表现为不同的8B灰度级,接收屏中离散像素的平面坐标可由探测器光敏单元网络进行位置标定,本系统通过CMOS探测器与电控箱中的图像处理模块对信标光进行联级处理,通过波门算法快速计算出较为精密的实时脱靶量,可在CMOS相机响应时间内显著提高跟踪误差的刷新率,从而加快对伺服系统的激励响应。

2.2 粗跟踪环路设计

粗跟踪环路结构示意图如图 1 所示,其工作流程为:当信标光捕获环节在视场内捕获到光斑之后(或指向环节完成后靶心距离光斑很近,不需要进行捕获指令),自发(或手动)进入粗跟踪环节^[8],在接收端光学系统中,CMOS 相机用来接收光斑并将接收信号 $E_a(S)$ 传输给电控箱的图像处理模块,利用质心跟踪算法对光斑进行定位计算,通过接口 RS485 向伺服控制板传输光斑对于相机靶心的脱靶量,由控制板控制伺服电机并进行脱靶补偿控制。与此同时,光闭环具有反馈功能,可以实时得到用于闭环系统激励的偏差信号,利用偏差信号对伺服转台进行角度控制,直至光学天线的视轴与接收光束的中心光轴重合。

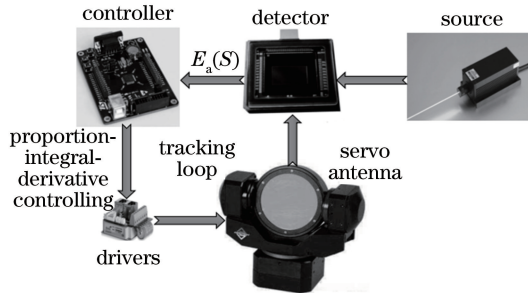


图 1 粗跟踪环路结构示意图

Fig. 1 Schematic of coarse tracking loop structure

实际跟踪过程中,系统对捕获/跟踪切换模式的临界响应会以跃阶振荡的形式出现在跟踪环节中,因此采用带执行器饱和比例积分(PID)控制器,结合非线性限位控制算法对该振荡信号进行抑制,从而完成对光斑的高精度跟踪。令执行量为 u ,则 PI 算法可表示为

$$u = K_p e + K_i m, \quad (7)$$

式中 e 为由 CMOS 反馈的脱靶量, K_p 和 K_i 分别为比例环控制系数和积分环控制系数, m 为系统误差均值。最终输出值 O 可表示为

$$O = \begin{cases} u, & u < L \\ L, & u > L \end{cases}, \quad (8)$$

式中 L 为给定的限位极限值^[9]。(7)式中的误差均值由均值滤波器得出,将其加入到积分控制器中,可对跟踪误差进行进一步补偿。

3 实验系统的搭建

3.1 系统架构与工作流程

为提高控制系统及反馈系统的工作稳定性,设计了指向捕获跟踪系统。图 2 为伺服控制系统架构示意图,系统主要由总控、电控箱、伺服控制板、装配伺服电机的伺服转台、COMS 探测器、伺服电机驱动器、编码器以及控制电控箱的计算机组成。伺服转台俯仰轴以及方位轴采用的电机分别为成都微精电机公司(九〇六厂)的型号为 J250LYX01 和 J215LYX80 的有刷直流力矩电机,电机驱动器选用 Elmo Gold Solo Whistle,电流环采样率为 25 kHz,伺服带宽为 4 kHz,速度环采样率为 12.5 kHz,采用(正)比例、积分、(负)比例(PIP)调节器,环路带宽小于 500 Hz,位置环采样频率为 12.5 kHz,伺服带宽小于 200 Hz,支持 75 MHz 带宽增量式编码器,满足伺服电机控制要求。采用 RENISHAW 公司的直径为 75 mm 的圆光栅编码器作为反馈敏感器,每刻划 20 μm ,读数头有 100 倍电学细分。32 位元精简指令集处理器(ARM)的控制板采用 STM32F4 系列芯片作为控制芯片,与电控箱通过 RS422 通信协议进行全双工通信,负责对伺服电机的驱动单元发出动态指令,并通过电机运动过程中编码器的编码值对总控进行伺服闭环反馈。电控箱由图像处理模块、光电探测模块和总控通信模块组成,电控箱以现场可编程门阵列为硬件架构,采用 RS422 通信协议进行通信,主要负责总控与控制板之间的通信以及光闭环图像处理工作。总控与电控箱之间通过计算机进行全双工通信,总控以 LabVIEW 为编程环境,与 ARM 控制板、驱动器之间形成多重闭环控制回路,以完成对整个 PAT 工作的指令控制与监控。

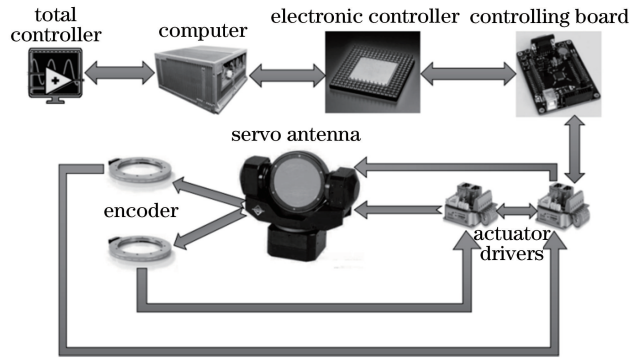


图2 伺服控制系统架构示意图

Fig. 2 Schematic of servo control system structure

伺服系统的工作流程如下:1) 通电后进行总控指向注入指令,该指令经计算机处理后通过串口通信传递给电控箱,波特率为 $115200 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}$;2) 电控箱将采集的指令通过串口通信协议传递给控制板,控制板执行驱动器的命令,串口协议中包括帧头、指令数据和帧尾;3) 控制板通过控制器局域网总线对驱动器进行指令操作,波特率为 $500 \text{ kbit}\cdot\text{s}^{-1}$;4) 驱动器解析出指向指令后,通过控制脉冲宽度调制波占空比来控制电机的指向位置及运动姿态,编码器在电机运行的过程中将电机实时位置信息通过驱动器逐级反馈给总控,直至最终将电机偏转至某一特定的不确定区域,完成指向环节;5) 指向环节结束后,在总控中注入捕获指令,通过各级通信协议驱动电机,进行螺旋光栅扫描,这时编码器将电机线位值反馈给总控以进行实时监控。

3.2 伺服系统的传函与校正工作

伺服系统的建立主要基于经典控制理论^[10]。在PAT系统开始工作之前,为了使伺服电机受控,需要对其进行参数整定。

以方位轴电机为例,查手册得知该电机的连续堵转电流为 1.8 A ,峰值电流需控制在 5 A 以内,最高转速不得超过 $372 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。设置好电源及转速参数后,对其进行开环扫频分析,为了提高扫频精度,采用正弦扫频模式,开环截止频率设置为 100 Hz ,扫频分析结果以伯德图形式给出,开环扫频特性曲线如图3所示。

利用PI调节器及PIP调节器对方位轴电机进行电流环、速度环和位置环整定,得到方位轴伺服频域特性曲线如图4所示。由图4可见,最终方位轴伺服电机相位裕度为 80° ,增益裕度为 35 dB , -3 dB 带宽为

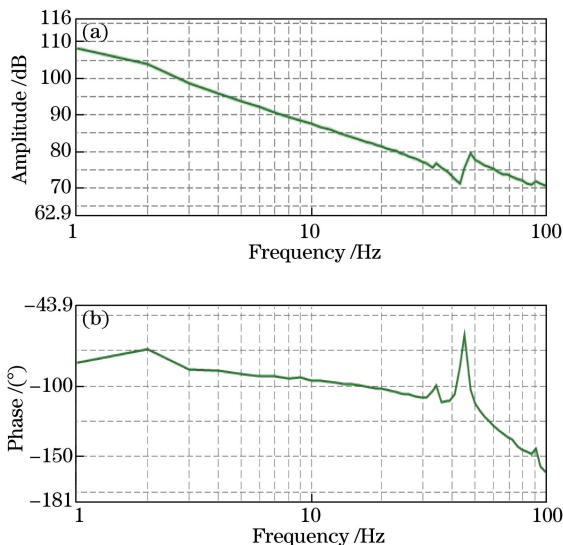


图3 开环扫频特性曲线。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 3 Characteristic curves of open-loop frequency sweep.

(a) Amplitude-frequency characteristic;

(b) phase-frequency characteristic

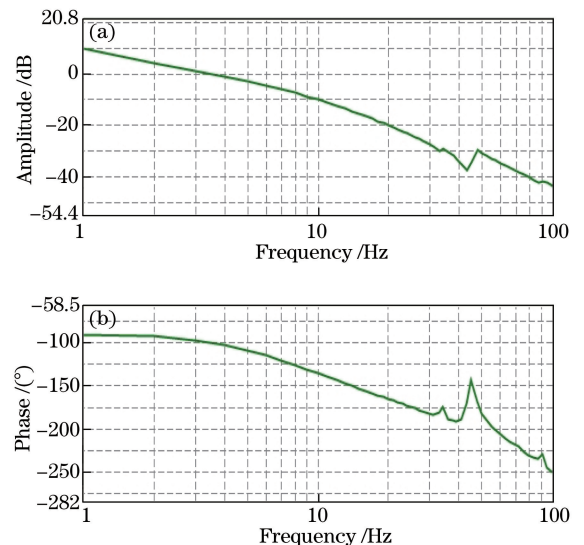


图4 方位轴伺服电机频域特性曲线。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 4 Frequency domain characteristic curves of azimuth axis servo motor.

(a) Amplitude-frequency characteristic;

(b) phase-frequency characteristic

1.5 Hz, 伺服系统的稳定度得到了提升。

俯仰轴整定后的频域特性曲线如图 5 所示。由图 5 可见, 最终俯仰轴伺服电机相位裕度为 85° , 增益裕度为 36 dB, -3 dB 带宽为 1.3 Hz, 俯仰轴的整定结果略优于方位轴的整定结果, 满足系统指标要求。

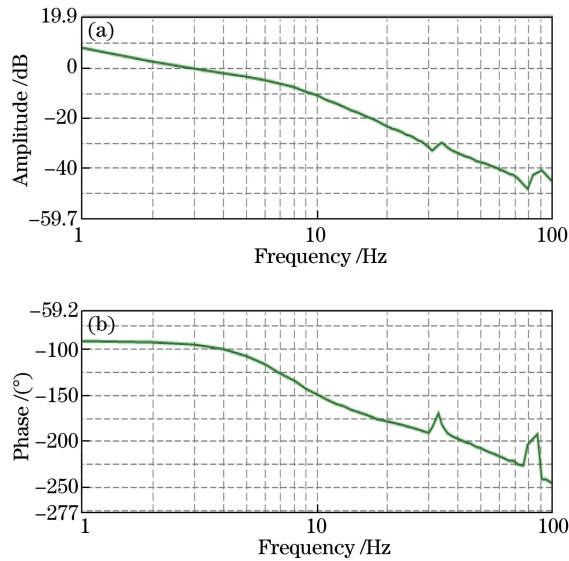


图 5 俯仰轴频域特性曲线。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 5 Frequency domain characteristic curves of pitch axis.

(a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic

4 系统模拟光闭环跟踪实验的设计与实验结果

结合图 1 及(1)~(8)式设计出粗跟踪光闭环和执行程序, 光闭环原理图如图 6 所示。当探测器在捕获过程中探测到光斑后, 停止捕获指令并执行跟踪指令, 光斑相对视场中心的脱靶量主要以跃阶信号的形式对控制系统进行评价, 并通过电控箱将脱靶量实时传递给控制板和总控, 利用控制板产生的激励信号控制驱动器并对系统进行跟踪, 具体激励方式在串口中断服务函数中对反馈数据进行解析提取, 脱靶量数据长度为 8 B, 包括帧头及求和校验。在每一个相机响应周期内, 根据解析出的脱靶量及各级反馈传函 $H(S)$ 对控制回路进行比例积分微分(PID)结合非线性限位算法的动态调控, 之后返回中断, 等待下一个响应标志位。上位机利用 LabVIEW 对跟踪误差及电机伺服反馈进行时域分析。由 CMOS 探测器、电控箱、控制板、总控监控面板、伺服转台以及电机驱动形成了一个光闭环回路, 共同完成了光端机对信标光的跟踪工作。

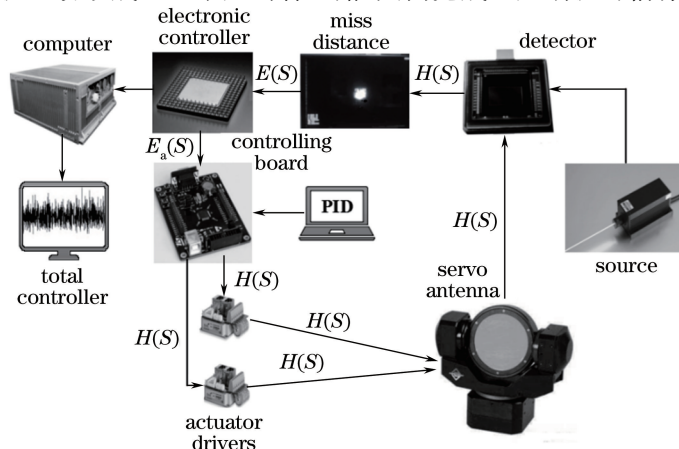


图 6 光闭环原理示意图

Fig. 6 Diagram of optical closed-loop principle

以方位轴为例,将控制平面激励平台进行的匀速简谐运动作为动态模拟条件,从而建立并实现方位轴对信标光动态闭环跟踪的验证实验。设置平面激励平台的运动速度为 $100 \mu\text{rad/s}$,在 $\pm 500 \mu\text{rad}$ 之间做正弦运动。在电机非励磁状态下,平台水平方位运动轨迹示意图如图 7 所示。

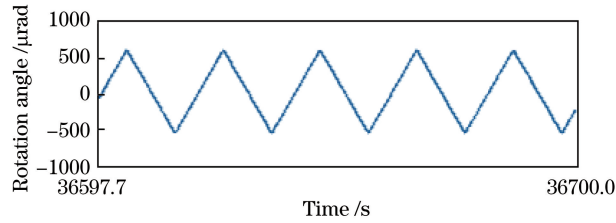


图 7 平台水平方向运动轨迹示意图

Fig. 7 Schematic of platform horizontal motion trajectory

设定伺服电机最大角速度为 $1 (^{\circ})/\text{s}$,最大角加速度为 $1 (^{\circ})/\text{s}^2$ 。光闭环跟踪系统与电机伺服系统稳定后,方位轴跟踪精度和俯仰轴跟踪精度示意图分别如图 8、9 所示。

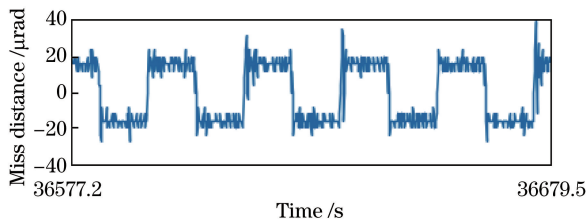


图 8 方位轴脱靶量示意图

Fig. 8 Schematic of azimuth axis miss distance

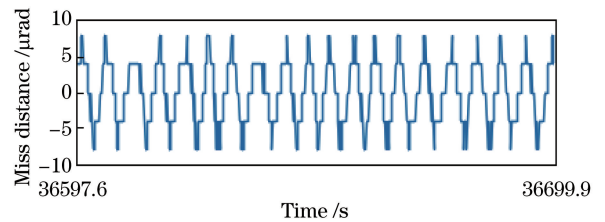


图 9 俯仰轴脱靶量示意图

Fig. 9 Schematic of pitch axis miss distance

由图 8、9 可见,在接收端动态运动的模拟条件下,方位轴的跟踪精度为 $\pm 20 \mu\text{rad}(3\sigma)$,这里将俯仰轴跟踪精度视为静态跟踪精度,跟踪精度为 $\pm 7.5 \mu\text{rad}(3\sigma)$ 。经观察可得动态跟踪误差远高于系统预期指标要求。经多次实验证明,俯仰轴与方位轴跟踪运行良好,并具有较高的稳定性和重复性,可以有效实现星地链路通信环境下链路通信的模拟。各方位伺服电机具有较低的伺服带宽,为后续粗精复合跟踪提供了良好条件。

5 结 论

对星地链路激光通信中地面接收机跟踪系统控制系统与光闭环组合的多重闭环环路进行优化设计,对各轴电机进行了参数整定,使其在保证光闭环正常稳定工作的同时为后续加入高动态振镜精跟踪环路保留余量。利用 LabVIEW-ARM-ELMO 驱动器的控制模式,最大程度地简化了伺服系统结构,在光闭环中加入 PID 结合限位算法对跟踪误差进行了有效补偿。实验结果表明,系统最终获得的动态跟踪精度为 $\pm 20 \mu\text{rad}(3\sigma)$,静态跟踪精度为 $\pm 7.5 \mu\text{rad}(3\sigma)$,具有良好的适应性及系统稳定性。

参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
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.
- [2] Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Zhao Xin, *et al.* Simulation system of the beacon pointing and acquisition process in 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.
- [3] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680.

- 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
- [4] Lu Ning, Ke Xizheng, Zhang Hua. Research on APT coarse tracking in free-space laser communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 943-949.
卢宁, 柯熙政, 张华. 自由空间激光通信中 APT 粗跟踪研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 943-949.
- [5] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵馨, 宋延篙, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- [6] Chen Ansong. The research on spot detection technology of coarse tracking unit about space laser communication based on FPGA[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
陈安松. 基于 FPGA 的空间激光通信粗跟踪单元光斑检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [7] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.* Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
- [8] Jiang Lun, Hu Yuan, Wang Chao, *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. 一点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.
- [9] Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, *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.
- [10] 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.