

# 空间激光通信组网从光端机控制技术研究一

白杨杨<sup>1,2</sup>, 岑远遥<sup>1</sup>, 孟立新<sup>1,2</sup>, 张乐仪<sup>1</sup>, 张立中<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学空地激光通信技术国防重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 为提高空间激光通信效率,实现空间激光通信组网,对激光通信组网从光端机控制技术进行研究。首先,阐述空间激光通信组网“一对四”系统原理,并分析从光端机控制方式;然后,对从光端机捷联控制技术建立数学模型并设计非线性跟踪微分器,对从光端机的方位轴进行 MATLAB 仿真分析;最后,搭建组网通信系统,对从光端机进行实验。实验结果表明,从光端机在引入非线性微分跟踪器后,其方位轴跟踪精度从  $105 \mu\text{rad}(3\sigma)$  降低到  $31 \mu\text{rad}(3\sigma)$ ,系统精度得到了有效的提高。

**关键词** 光通信; 激光通信组网; 从光端机; 视轴稳定; 微分测速

中图分类号 TN9291

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1406001

## Control Technology of Slave Optical Transceiver in Space Laser Communication Network

Bai Yangyang<sup>1,2</sup>, Cen Yuanyao<sup>1</sup>, Meng Lixin<sup>1,2</sup>, Zhang Leyi<sup>1</sup>, Zhang Lizhong<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Mechatronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Slave optical transceiver control technology in a laser communication network was assessed to improve the efficiency of space laser communication and realize a space laser communication network. First, the principle of a "one-to-four" system in a space laser communication network was evaluated, and the control mode of a slave optical transceiver was analyzed. Second, a mathematical model of the strap-down control technology of a slave optical transceiver was established, and a nonlinear tracking differentiator was designed. The azimuth axis of the slave optical transceiver was simulated and analyzed by using MATLAB software. Finally, a network communication system was constructed to test the slave optical transceiver. The experimental results show that after introducing the nonlinear tracking differentiator, the azimuth-tracking accuracy of the slave optical transceiver is reduced from  $105 \mu\text{rad}(3\sigma)$  to  $31 \mu\text{rad}(3\sigma)$ , and the system accuracy is improved significantly.

**Key words** optical communications; laser communication network; slave optical transceiver; line of sight stabilization stabilization; differential velocimetry

**OCIS codes** 060.4510; 060.6718; 100.4997

## 1 引言

目前,研究激光通信技术时主要采用点对点通信形式,但点对点通信不能满足大容量、高速率的通

信要求<sup>[1-3]</sup>。空间激光通信组网的方式则能实现信息传输的高效率、星间链路的可靠性,因此组网的通信方式也是激光通信技术的一个主要发展方向<sup>[4-6]</sup>。

对于一对多或多对多通信,美国和日本等国家

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-12-05; 录用日期: 2021-02-07

基金项目: 教育部高校博士点基金(2013221110006)

通信作者: \*zlzcust@126.com

均进行了相关的研究,例如美国的天基激光通信和日本的轨道全球通信组网,均采用微波与激光通信相结合的组网方式<sup>[7-8]</sup>。该组网方式的优点是覆盖面较大,不同通信方式进行优势互补,缺点是结构过于复杂。长春理工大学在一对多组网通信中提出了一种反射镜拼接技术的方案,实现室内“一对二”的空间激光通信<sup>[9-11]</sup>,优点是结构简单、视场大及小型化,主要缺点是在动基座下伺服控制难度较大。

空间激光通信组网网络拓扑图如图 1 所示。每个编队中的主节点光端机需至少具备一对多(4 条链路)同时激光通信的能力。多个编队按照一定的队形协调运动时,每个编队的主节点彼此连接构成网络主干,同时分别接入若干接入节点,每个主节点都可通过多个链路与另外的主节点和接入节点同时建立链接,从而建立多对多同时激光通信主干接入网络。系统主要指标:主节点同时通信激光链路数量大于等于 4;激光信道带宽大于等于 40 Gbit/s;传输速率为 1~10 Gbit/s(分档可调);误码率优于  $10^{-7}$ ;通信距离大于等于 1000 km(等效);光路由交换信道 4。

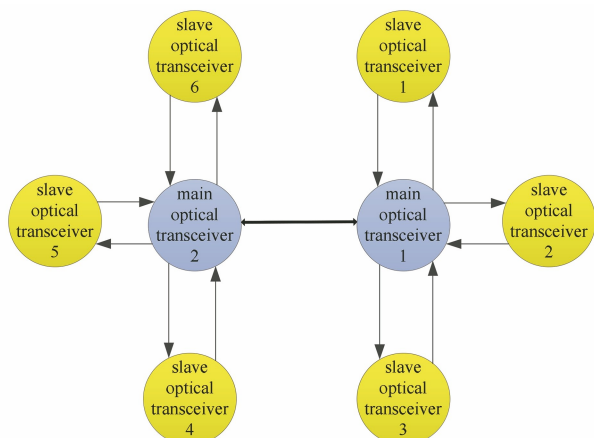


图 1 空间激光通信组网网络拓扑图  
Fig. 1 Network topology of space laser communication network

本文基于“一对四”空间激光通信组网系统,首先介绍“一对四”系统组成原理和分析从光端机控制方式;然后采用捷联稳定技术稳定控制从光端机,对捷联稳定系统中的差分测速和微分测速的方式进行分析;最后对从光端机粗跟踪系统设计相应的伺服系统,根据组网通信原理,对搭建的从光端机实验平台进行实验验证。

## 2 系统组成与从光端机稳定机理

### 2.1 组网粗跟踪系统组成原理

激光通信组网系统主要由主光端机和从光端机

组成,利用一个主光端机中的 4 组天线实现与 4 个从光端机间的实时收发控制。光端机系统组成如图 2 所示,其中  $\lambda_1$  为 1550 nm,  $\lambda_2$  为 1530 nm,通过光开关实现 4 条不同链路的路由交换功能。

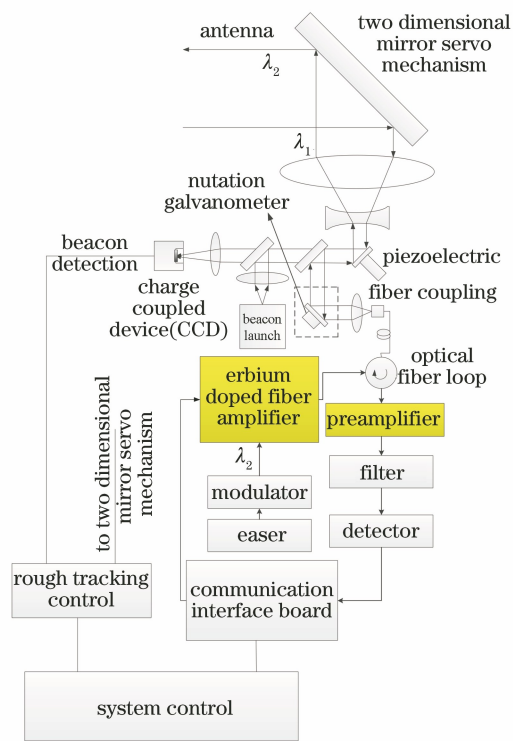


图 2 光端机系统结构

Fig. 2 Structure of optical transceiver system

图 3 为主光端机结构,为实现空间激光通信组网,主光端机的光学天线由 4 块反射镜组成,每一块反射镜均对应一个跟踪单元。跟踪单元由一个两轴两框架的跟踪转台组成,方位轴运动范围为  $-61^\circ \sim 61^\circ$ ,俯仰轴运动范围为  $-19^\circ \sim 19^\circ$ ,由 2 个永磁同步电机直接驱动方位轴和俯仰轴旋转。主光端机使用 CCD 相机接收从光端机发射的信标光,经可编程逻辑门阵列(FPGA)进行处理后提取出对应的脱靶量信息。然后通过光闭环控制实现主光端机的动态跟踪,并将跟踪误差控制在精跟踪视场内。

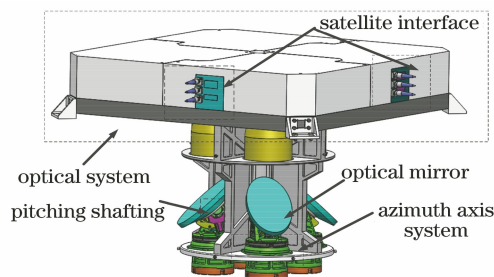


图 3 主光端机结构

Fig. 3 Structure of main optical transceiver

图 4 为从光端机结构,从光端机跟踪单元采用的是两轴两框架结构的转台,方位轴运动范围为  $-150^{\circ} \sim 150^{\circ}$ ,俯仰轴运动范围为  $-7.5^{\circ} \sim 7.5^{\circ}$ ,由 2 个永磁同步电机直接驱动方位轴和俯仰轴运动。从光端机同样采用 CCD 相机对主光端机发射的信标光进行探测接收。在从光端机基座上安装一个 STIM300 微机械陀螺,获得从光端机姿态信息后,进行稳定环控制,保证从光端机对主光端机发射的信标光进行实时的捕获跟踪。

主从光端机采用单反射镜方案,主要考虑因素为:光学负载若为望远单元系统,会使整个光机结构

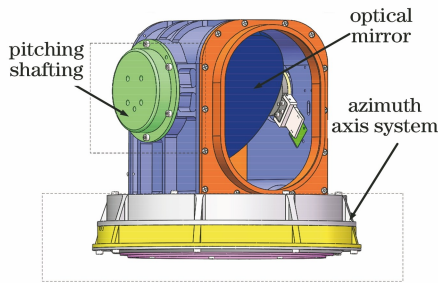


图 4 从光端机结构

Fig. 4 Structure of slave optical transceiver

尺寸变大,同时增加了伺服控制系统的控制难度;为实现组网系统的轻小型化,将望远系统内置(Optical system 部分为通信与信标光路折返系统,详见图 2),通过反射镜折返实现光束收发控制,这样主光端机裸露部分尺寸比较紧凑,同时光学负载为一块反射镜,提高了系统的动态响应性能,保障了跟踪精度。

### 2.2 从光端机控制策略分析

在一对多激光通信组网中,当有多个低轨卫星(从光端机)需要信息传递时,需要先与同轨中继卫星通信,则需要中继卫星能够实现一点对多点通信。从光端机处于动基座下的工作状态时,使用传统的三环控制结合光闭环的控制方式不能保证其跟踪精度,针对这一问题,需要增加控制从光端机的稳定环。因为从光端机方位轴与俯仰轴结构的限制,不能简单地将陀螺直接安装在轴上,因此采用捷联稳定方案<sup>[12]</sup>。图 5 为从光端机总控制方案,通过 FPGA 采集陀螺仪并解算获得姿态信息,通过将信息发送至 STM32 控制器,STM32 根据反馈的姿态信息和光栅编码器信息,实现从光端机的闭环控制,保证从光端机在动态跟踪下的实时性。

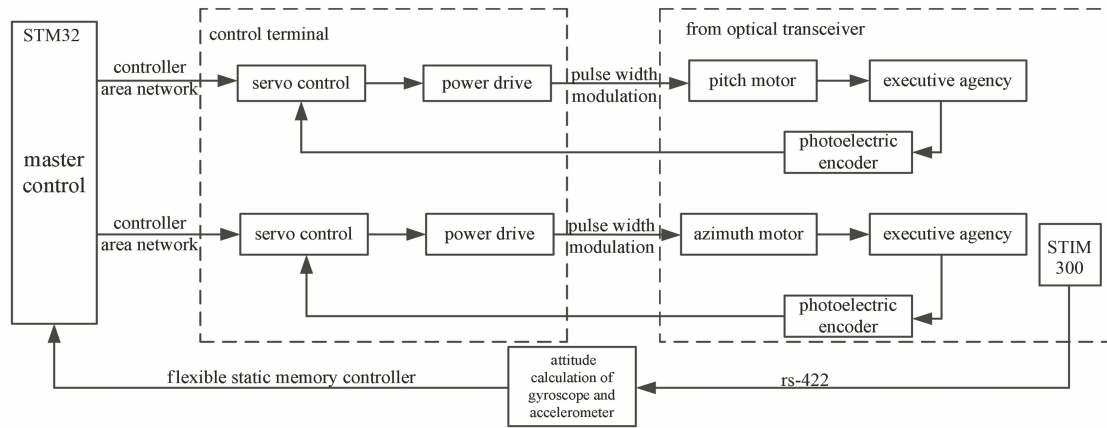


图 5 从光端机总体控制方案

Fig. 5 Overall control scheme of slave optical transceiver

在捷联稳定平台中,框架角速率的提取将会直接影响粗跟踪系统的控制精度,传统的角速率提取则是通过差分测速的方式获得的,这种方案的缺点是无法规避误差放大的问题。采用非线性跟踪微分器进行微分测速则能抑制系统噪声带来的影响。因此在从光端机控制中,采用捷联技术和微分测速技术。

### 2.3 捷联控制策略

采用捷联稳定方案,从光端机的方位坐标系与载体坐标系之间的坐标变换矩阵为

$$C_m^o(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\theta$  为方位轴转动角度; $t$  为时间域变量。

设载体角速度是  $\omega_m(t) = [\omega_{mx}, \omega_{my}, \omega_{mz}]^T$ ,方位轴角速度为  $\omega_o(t) = [\omega_{ox}, \omega_{oy}, \omega_{oz}]^T$ ,则得到

$$\omega_o(t) = C_m^o(t)\omega_m(t) + \dot{\theta}(t), \quad (2)$$

式中: $\dot{\theta}(t) = [0, \dot{\theta}, 0]^T$ ,  $\dot{\theta} = \omega_{oy} - \omega_{mz}$ 。

将(2)式代入(1)式,可得方位轴的角速度:

$$\boldsymbol{\omega}_o(t) = \begin{bmatrix} \omega_{ox} \\ \omega_{oy} \\ \omega_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{mx} \cos \theta - \omega_{mx} \sin \theta \\ \omega_{my} + \dot{\theta} \\ \omega_{mx} \sin \theta + \omega_{mx} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

从光端机捷联控制原理如图 6 所示。

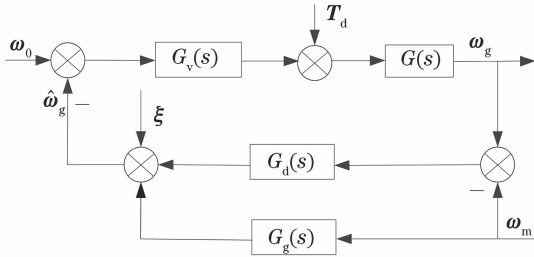


图 6 捷联稳定控制原理

Fig. 6 Strapdown stability control principle

图 6 中,  $\boldsymbol{\omega}_0$  为输入角速度,  $\boldsymbol{\omega}_g$  为惯性空间角速度,  $\boldsymbol{\omega}_m$  为姿态扰动角速度,  $\hat{\boldsymbol{\omega}}_g$  为角速度反馈信息,  $\boldsymbol{T}_d$  为平台扰动力矩,  $\boldsymbol{\xi}$  为平台噪声,  $G_v(s)$  为速度环传递函数,  $G(s)$  为被控对象的传递函数,  $G_d(s)$  为

测速环节的传递函数,  $G_g(s)$  为陀螺传递函数;  $s$  为拉普拉斯中间变量。

根据捷联稳定控制系统的原理可知, 视轴在惯性空间中的速度关系为

$$\boldsymbol{\omega}_g = \frac{G_v G}{1 + G_d G_v G} \boldsymbol{\omega}_o + \frac{G_v G (G_d - G_g)}{1 + G_d G_v G} \boldsymbol{\omega}_m - \frac{G_v G}{1 + G_d G_v G} \boldsymbol{\xi} + \frac{G}{1 + G_d G_v G} \boldsymbol{T}_d \quad (4)$$

根据(4)式可知, 影响捷联稳定的主要是载体扰动、陀螺噪声及扰动力矩等因素。从光端机的工作过程为: CCD 相机通过光学系统实时测量跟踪目标的位置, 完成位置闭环; 通过 STIM300 陀螺实时采集从光端机的姿态信息, 通过控制框架驱动电机, 完成从光端机的稳定环控制, 保证从光端机的视轴指向始终处于靶心位置。图 7 为捷联稳定系统的控制方案。其中  $q$  为跟踪指令,  $G_p(s)$  为位置环控制器,  $K_e$  为反电动势,  $R_a$  为电枢电阻,  $L_a$  为电枢电感,  $J$  为平台转动惯量,  $\varphi$  为稳定平台输出指令。

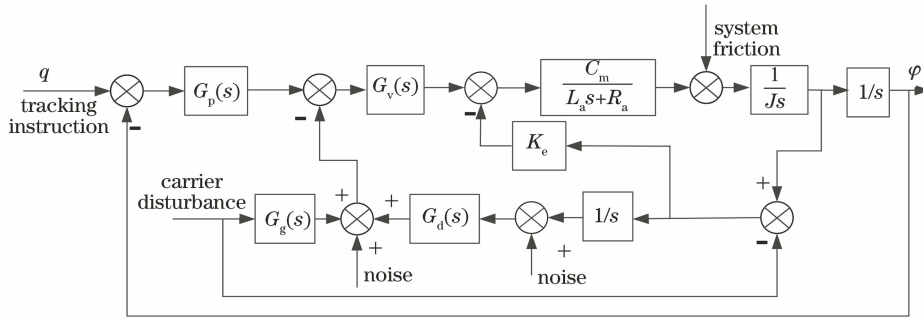


图 7 捷联系统控制方案

Fig. 7 Strapdown system control scheme

### 3 从光端机粗跟踪技术

#### 3.1 粗跟踪系统频率测试

粗跟踪系统理论上属于采样伺服系统, 系统执行单元为永磁同步电机, 以方位轴为例, 施加正弦激励信号:

$$S(t) = A \sin[2\pi \times f(1 + 0.25t)], \quad (5)$$

式中:  $S(t)$  为正弦激励信号;  $A$  为幅值;  $f$  为扫描频率。设扫频初始频率为  $f_0$ , 截止频率为  $f_t$ 。为辨识出系统的传递函数, 需要对系统输入正弦激励信号。确定出正弦激励信号中的参数为  $A = 5$ ,  $f_0 = 0.005 \text{ Hz}$ ,  $f_t = 150 \text{ Hz}$ ,  $t = 200 \text{ s}$ 。

图 8 为系统方位轴频率特性测试实验, 嵌入式单片机 STM32F407ZGT6(简称: STM32)产生一组频率从 0.005 Hz 到 150 Hz 的连续正弦脉冲波, 驱动方位轴电机按给定幅值与相位进行正弦摆动。

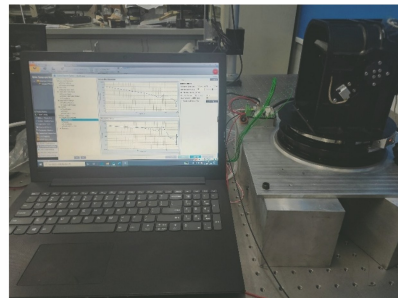


图 8 从光端机方位轴频率特性实验

Fig. 8 Frequency characteristic experiment of azimuth axis from slave optical transceiver

STM32 定时器获得光栅编码器反馈的位置信息。在 STM32 定时器中设置 1 ms 定时中断, 在定时器中断里进行微分得到方位轴的转速, 记录转台实时输入数据与输出数据并发送至上位机。经过相关分析法对数据进行处理, 得到从光端机的幅频和相频

曲线,如图 9 所示。

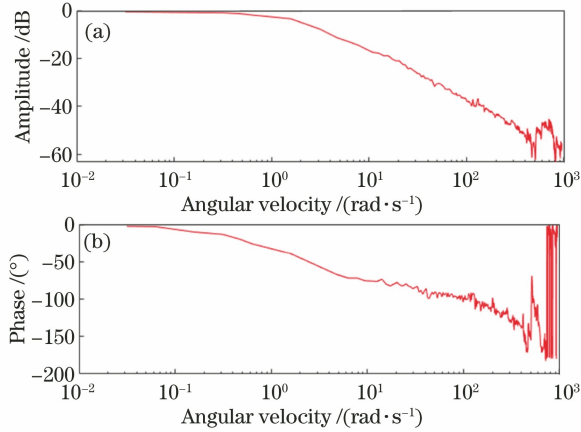


图 9 方位轴频率特性测试。(a) 幅频特性曲线;  
(b) 相频特性曲线

Fig. 9 Frequency characteristic test of azimuth axis. (a) Amplitude frequency characteristic curve; (b) phase frequency characteristic curve

通过 MATLAB 软件绘制出方位轴的频率特性曲线,并采用最小二乘法对从光端机方位轴传递函数进行辨识。从光端机工作在低频段,因此只需辨识其低频段下的传递函数,图 10 为系统频率特性辨识结果,传递函数为

$$G(s) = \frac{589.9}{s^2 + 403.1s + 698.4} \quad (6)$$

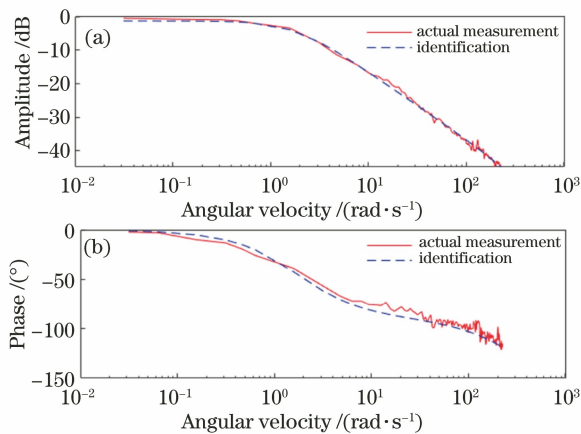


图 10 方位轴频率特性辨识。(a) 幅频辨识曲线;  
(b) 相频辨识曲线

Fig. 10 Frequency characteristic identification of azimuth axis. (a) Amplitude frequency identification curve; (b) phase frequency identification curve

### 3.2 非线性跟踪微分器设计

捷联稳定平台控制中,传统测速方案为差分测速,不能避免误差放大而影响整个跟踪系统的跟踪精度的弊端。在组网系统中,从光端机工作时存在不连续或随机噪声,而非线性跟踪微分器对系统噪

声有较好的抑制效果,同时具有较高的效率。

图 11 为跟踪微分器的结构形式。给定一个输入信号  $v(t)$ , 经过跟踪微分器后输出两个信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$ , 其中  $x_1(t)$  为  $v(t)$  的跟踪信号,  $x_2(t)$  为  $v(t)$  的微分信号。即

$$\begin{cases} x_1(t) = v_0(t) \\ x_2(t) = \dot{v}_0(t) \end{cases} \quad (7)$$

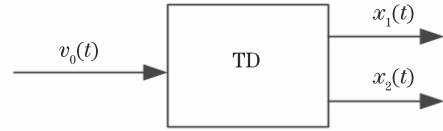


图 11 跟踪微分器的结构形式

Fig. 11 Structure of tracking differentiator (TD)

离散形式的跟踪微分器为

$$\begin{cases} x_1(t+1) = x_1(t) + hx_2(t) \\ x_2(t+1) = x_2(t) + hf[x_1(t) - v(t), x_2(t), \delta, h_0] \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $h$  为采样周期;  $\delta$  为非线性跟踪微分器的速度因子, 主要影响跟踪的速度;  $f(\cdot)$  为最速控制函数;  $h_0$  为滤波因子, 主要影响滤波的效果。

$$\begin{cases} d = \delta * h_0 \\ d_0 = h_0 * d \\ y = x_1 + h_0 * x_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8\delta |y|} \\ f(x_1, x_2, \delta, h_0) = \begin{cases} -\delta * \text{sgn}(a), & |a| > d \\ -\frac{\delta * a}{d}, & |a| \leq d_0 \end{cases} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sgn}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $d$ 、 $a$ 、 $d_0$  均为计算的中间变量。通过增大非线性跟踪微分器中的滤波因子  $h_0$  和速度因子  $\delta$ , 可以改变系统的跟踪速度和噪声滤波效果。

### 3.3 系统建模仿真分析

针对从光端机系统中惯性元件角位置信号的微分求取过程, 采用非线性跟踪微分器, 对从光端机的跟踪系统进行 MATLAB 仿真分析。取采样时间为 1 ms, 从光端机的扰动为  $2^\circ$ , 频率为 0.25 Hz, 将系统噪声均方差为 0.001 的高斯白噪声作为仿真时的位置信号; 速度因子选择  $\delta = 10$ ; 滤波因子  $h_0 = 0.01$ 。图 12 为差分测速下方位轴跟踪误差曲线, 图

13 为微分测速下方位轴跟踪误差曲线,图 14 为频域下不同测速方案下跟踪系统的闭环伯德曲线。

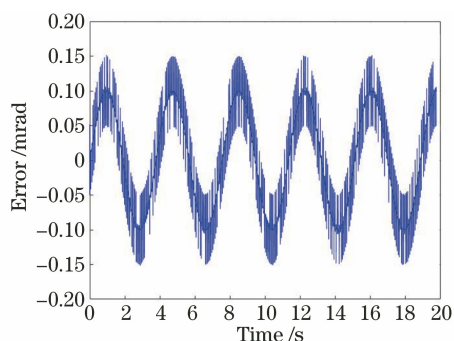


图 12 差分测速下的 PD 控制跟踪误差

Fig. 12 Tracking error of PD control under differential velocity measurement

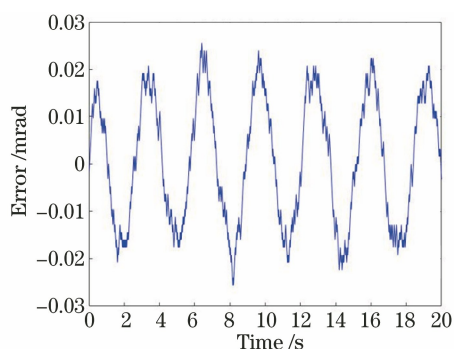


图 13 非线性跟踪微分器下的 PD 控制跟踪误差

Fig. 13 Tracking error of PD control with nonlinear tracking differentiator

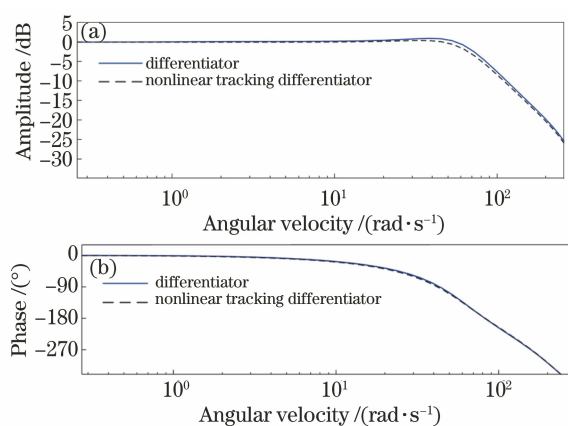


图 14 跟踪系统伯德图。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 14 Bode diagram of tracking system. (a) Amplitude frequency characteristics; (b) phase frequency characteristics

从图 12 可知:在不引入微分控制时,差分测速下的比例-微分(PD)控制对系统噪声的抑制效果较差,跟踪误差达到 0.15 mrad(3 $\sigma$ ),其中  $\sigma$  指正态分布中的标准差;由于噪声无法抑制,跟瞄系统会出现振荡。从图 13 可以看出,非线性跟踪微分器对系统

的噪声有较好的抑制作用,跟踪误差达仅 0.025 mrad(3 $\sigma$ ),通过对比可知,引入非线性跟踪微分器后,系统的跟踪精度提高 6 倍。通过仿真可得,基于微分测速的系统能够有效提高系统的粗跟踪精度。

图 12 和图 13 对系统在时域下的正弦跟踪性能进行了分析,跟踪系统在频域下的特性如图 14 所示。采用差分测速,跟踪系统带宽为 74 rad/s,谐振峰为 0.98 dB;采用非线性跟踪微分器,跟踪系统带宽为 70 rad/s,谐振峰 0.24 dB。分析可知,非线性微分器跟踪系统与差分测速跟踪系统带宽相当,同时非线性微分器有过渡过程,超调量约为差分测速的 1/4,保障了系统快速性的同时,提高了系统稳定性。

## 4 从光端机稳定性实验

### 4.1 从光端机硬件设计

为了验证从光端机基于非线性跟踪微分器下的跟踪性能,根据实验原理搭建实现系统,对从光端机进行粗跟踪精度实验,因此搭建如图 15 所示的从光端机的硬件系统,对从光端机进行稳定性实验。选择 Elmo 作为方位轴与俯仰轴的永磁同步电机的驱动元件;方位测角传感器采用 Renishaw 研制的光栅编码器;俯仰测角传感器采用 Micor-E 公司生产的扇形光栅;惯性测量元件选择的是 STIM300 微机械陀螺;主控制器选择 STM32 与 FPGA。

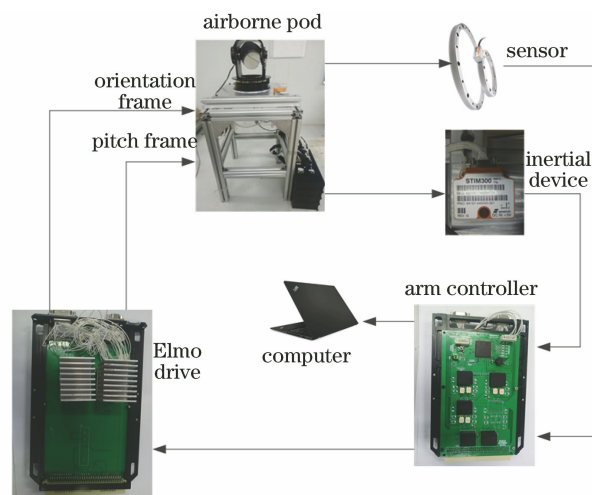


图 15 从光端机伺服硬件组成

Fig. 15 Hardware composition of airborne photoelectric pod in slave optical transceiver

### 4.2 从光端机稳定性动态实验

如图 16 所示,实验装置分为发射和接收两部分。发射端使用靶标作为模拟目标源,通过控制靶

标的方位轴和俯仰轴,模拟主光端机的运动,其由激光器(波长为 830 nm)、平行光管、反射镜及靶标控制器组成。在接收端中,从光端机置于三轴摇摆台上,模拟低轨卫星运动时的姿态,其由光学天线、CCD 相机、粗跟踪伺服控制系统、上位机组成。

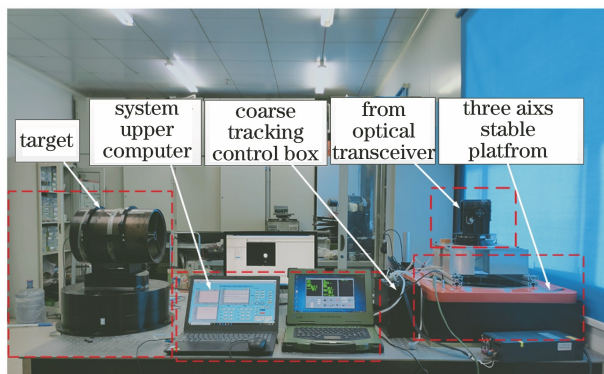


图 16 组网从光端机粗跟踪控制实验

Fig. 16 Experiment on coarse tracking control of slave optical transceiver in network

接收端光学天线中的反射镜作为独立单元,其粗跟踪相机探测视场为 4 mrad, CCD 相机的像元角分辨率为  $4 \mu\text{rad}$ , 帧频为 100 Hz。采用 STM32 和 FPGA 作为从光端机的控制器件,通过 FPGA 采集 STM300 陀螺仪的相关数据并完成数学解算,解算结果发送至 STM32 控制器,通过编程实现数字化控制。上位机软件使用 Labview 软件,所有子单元与粗跟踪伺服系统相连,采用 422 串口通信,并由上位机统一控制。

通过三轴摇摆台对从光端机施加幅值为  $1^\circ$ 、频率为 1 Hz 的正弦扰动,对靶标施加幅值为  $0.1^\circ$ 、频率为 0.5 Hz 的正弦扰动。通过使用传统的 PD 控制和基于非线性跟踪微分器的 PD 控制对从光端机方位轴稳定精度进行测试,测试结果如图 17 和图 18 所示。从图 17 可以看出:使用传统的 PD 控制方式时,从光端机方位轴的跟踪精度误差在  $105 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ );在上升和下降的跟踪误差比较平缓,但是在正弦引导换向时会产生较大冲击,出现一个较大峰值,

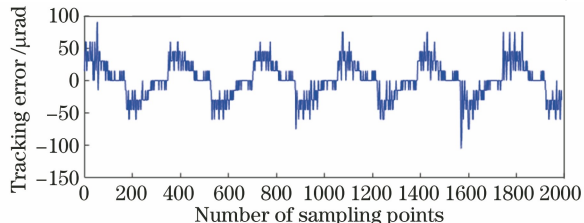


图 17 差分测速下方位轴跟踪误差

Fig. 17 Azimuth axis tracking error under differential velocity measurement

不能满足从光端机粗跟踪下跟踪精度为  $90 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 的指标。从图 18 可以看出:引入非线性跟踪微分器后,方位轴误差降低到  $31 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ),稳定精度提高了 3.38 倍,满足从光端机粗跟踪精度为  $90 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 的指标,为系统精跟踪控制设计提供了实验基础。

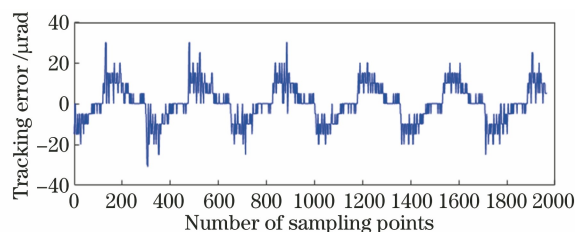


图 18 微分测速下方位轴跟踪误差

Fig. 18 Azimuth axis tracking error in differential velocimetry

## 5 结 论

对空间激光通信组网从光端机跟踪技术进行研究,建立从光端机捷联数学模型,通过 MATLAB 软件进行仿真分析,对比差分测速和微分测速的控制方案。差分测速方案下系统的跟踪精度为  $0.15 \text{ mrad}$  ( $3\sigma$ ),微分测速下系统的跟踪误差为  $0.025 \text{ mrad}$  ( $3\sigma$ ),跟踪精度提高 6 倍。在此基础上,通过搭建实验环境,在室内进行了粗跟踪控制技术的验证。微分测速条件下的跟踪精度  $31 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 是差分测速下的跟踪精度  $105 \mu\text{rad}$  ( $3\sigma$ ) 的 3.38 倍。实验结果表明,在组网通信中,基于微分测速的从光端机能够有效地提高粗跟踪精度,实验满足预期结果,满足空间激光通信组网粗跟踪性能要求,为精跟踪控制设计提供了实验基础。

## 参 考 文 献

- [1] 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.  
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.
- [2] Zhang Y L, An Y, Wang C, et al. Research on rotating paraboloid based surface in space laser communication network [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0706003.  
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.
- [3] 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.
- 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zeng F, Gao S J, San X G, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 65-73.
- 曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
- [7] Yin Z Z, Chen J Y, Zhou X W. Development and technology of US military satellite communications systems[J]. Communications Technology, 2009, 42(11): 55-58.
- 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.
- [8] 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.
- 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- 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.
- [11] 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.
- [12] Rudin R. Strapdown stabilization for imaging seekers [C] // Annual Interceptor Technology Conference, June 6-9, 1993, Albuquerque, NM, USA. Virginia: AIAA, 1993: 1-10.