

文章编号 1004-924X(2024)23-3469-10

轻量化量子跟踪系统复合轴精密控制

于帅北, 曹艳波*, 费 强*, 王 芳, 孙景旭
(季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘要: 基于量子加密的星地激光通信是一种比传统射频通信传输带宽高、数据安全性强的远程信息传输技术, 具有高码率、小型化和低功耗等优点。为了实现星地之间激光链路的联通, 地面光学终端与卫星光学载荷之间需要在通信时间窗口保证高精度跟踪瞄准, 然而, 地面光学终端在复杂环境中会受到多种传输干扰, 需要轻量化的地面激光跟踪终端的精密结构设计, 以及稳定可靠的跟踪控制算法。设计了一种基于双探测器的复合轴跟踪系统, 整机结构轻量化设计, 大口径成像系统使用一体化整体设计, 有效质量相比传统结构减轻了 50% 以上, 并采用跟踪架和快速反射镜两级跟踪的控制方式, 采用参数识别和基于主元分析神经网络算法的自动调谐优化控制技术, 通信时间窗口内跟踪误差 PV 值从 20" 以上减少到 5" 以下, 提高了轻量化激光通信跟踪系统的性能, 为星际激光通信技术提供高效的跟踪瞄准平台, 从而实现更高效的量子加密激光通信。

关键词: 激光通信; 复合轴控制; 压电陶瓷快速反射镜; PID 控制; 主元分析神经网络

中图分类号: TP273.1; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243223.3469

Precision control on composite axis of lightweight quantum tracking system

YU ShuaiBei, CAO Yanbo*, FEI Qiang*, WANG Fang, SUN Jingxu

(Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

* Corresponding author, E-mail: caoyb@jihualab.ac.cn; feiq@jihualab.ac.cn

Abstract: Satellite-to-ground laser communication utilizing quantum encryption has emerged as a novel method for long-distance information transmission, offering higher bandwidth and enhanced data security compared to traditional RF systems. This approach is characterized by its high bit rate, miniaturization, and low power consumption. To establish a reliable laser communication link between satellites and ground terminals, precise tracking and alignment between the ground optical terminal and the satellite optical payload must be maintained within the designated time window. This requirement is particularly challenging as the ground optical terminal operates under complex environmental conditions and various disturbances. Therefore, the design of a lightweight, high-precision ground laser tracking terminal, coupled with a stable and reliable tracking control algorithm, is essential. In this study, we propose a composite-axis tracking system incorporating dual detectors. The optical terminal is designed with a lightweight structure, utilizing a large-aperture reflective imaging system with an integrated, compact architecture and lightweight materials, achieving a weight reduction of over 50% compared to traditional designs. A two-stage

收稿日期: 2024-09-05; 修订日期: 2024-10-12.

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (No. 2018B030328001)

tracking control system is implemented, combining a gimbal and a fast steering mirror. The control system integrates parameter identification and auto-tuning optimization using a PCA-NN intelligent algorithm, reducing the PV (peak-to-valley) tracking error within the time window from over $20''$ to less than $5''$. This approach effectively addresses the challenges associated with lightweight laser communication tracking systems, providing a robust platform for broader applications in interstellar laser communication technologies and meeting the stringent requirements of quantum-encrypted laser communication.

Key words: laser communication; composite axis control; piezoelectric driving fast steering mirror; PID control; principle component analysis-neural network(PCA-NN)

1 引言

通过量子加密的自由空间卫星激光通信和现有的射频通信相比,具有传输速率高、通信带宽大、功耗低、质量轻、抗干扰和保密性高等诸多优点,是未来实现星间高码率通信的优选方案,在军用与民用领域获得广泛关注^[1-3]。国际上很多国家相继开展了大量空间激光通信相关领域的研发工作,已经成功实现高码率、小型化、轻量化和低功耗激光通信终端。要实现卫星量子加密的激光通信,激光和信息终端的光电跟瞄系统必须满足高精度跟踪瞄准的技术要求^[4-6]。为了达到高精度跟踪,同时又要满足通信终端轻量化的设计要求,本文采用双探测器复合轴跟踪技术,利用抗干扰的复合轴高精度跟瞄控制技术,实现了低误码率的星地量子加密激光通信。这种高可靠性的控制架构和基于新型材料的轻量化终端设计,可以作为未来激光通信地面终端的参考方案。

2 轻量化跟踪架及应用场景

在激光光束稳定和指向控制上,常用的复合轴控制方法通过低谐振频率的跟踪架控制粗精度大范围的角度指向,通过高谐振频率的快速反射镜控制高精度小范围的指向稳定,通过光学成像反馈和数据融合闭环的方式实现高效高精度的自由空间激光通信,从而保证可靠的信息数据安全传输。

图1为星地量子通信对准示意图,星地量子通信链路主要由星上量子通信部分和地面量子

跟踪仪部分组成。量子接收/发射系统实现量子信号的产生、调制、传输、探测和解调等功能。通过同步光发射系统和同步光接收系统引入时间同步光,标记接收方收到的量子态与发射方发射的量子态之间的对应关系。发射方根据同步光的脉冲序列编码发射量子态,接收方探测同步光以获得时间基准,得知当前量子态的标识。由于量子光发散角小,采用信标光接收/发射系统辅助捕获瞄准过程。星上任务规划处理系统控制星上指向系统在指定时间指向固定的地面位置。地面量子跟踪仪的任务规划系统处理卫星轨道根数安排量子跟踪仪的任务。跟踪控制系统通过驱动二维转台机构,实现对卫星的捕获、瞄准和跟踪,跟踪精度满足量子通信的精度要求后,开始通信。

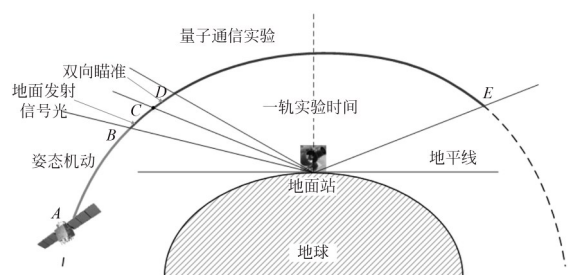


图1 自由空间激光量子通信原理

Fig.1 Schematic diagram of free space laser quantum communication

对于室外有独立隔振地基的光学跟踪设备,常规光学跟踪精度一般在 $20''$ (1σ) 左右,而没有相关基础条件的光电系统,跟踪精度会变差。实验系统的技术指标要求跟踪精度优于 $5''$,跟踪仪高精度指向卫星,上行信标激光的发

散角在 mrad 级,能够很好地覆盖卫星,使得星上更容易捕获信标。星上终端接收上行信标激光,双向跟瞄卫星光轴对准跟踪仪望远镜光轴,在合适的高角条件下跟踪仪与卫星稳定光闭环跟踪,进行高效星地量子通信^[7]。具体实验过程包括:星上发射下行 850 nm 和 815 nm 信号光,进入地面终端轻量化跟踪仪的接收大口径反射式光学系统,通过跟踪架粗跟踪将光斑引至相机定标点。此时,815 nm 通信光进入精跟踪的视场,通过目标提取和脱靶量处理,驱动快速反射镜实现高带宽的精跟踪闭环。通过控制算法修正跟踪架粗跟踪的残余误差,从而使跟踪精度的标准差不大于 2"。通过这种整体化设计确保地面终端轻量化跟踪仪接收的下行密钥与通信激光在光纤视场中心。

压电陶瓷快速反射镜具有响应速度快、功耗低和位移控制精度高等优点。因此,高带宽的快速反射镜控制成为高带宽高精度激光跟踪的重要选型目标,满足实时激光通信的应用需求。

3 控制模型及分析

轻量化激光通信地面跟踪系统主要由 T 型跟踪架、粗跟踪光学负载、精跟踪光学负载和激光发射负载组成,如图 2 所示。其中,T 型跟踪架作为光学系统大范围光束捕获和瞄准的运动平



图 2 轻量化跟踪架

Fig. 2 Light-weighting gimbal terminal

台。跟踪架的方位轴可以实现 $\pm 270^\circ$ 的旋转运动,俯仰轴可以实现 $-5^\circ \sim 95^\circ$ 超过半球范围的转动。控制跟踪架转动,粗跟踪光学系统将合作目标捕获后,精跟踪光学可以精确锁定目标,并进行自由空间激光通信。

T 型跟踪架采用模块化设计,结构如图 3 所示,方位轴系和俯仰轴系采用机械轴承支撑方式,结构件大部分采用铝合金材料。跟踪架的谐振频率如图 4 所示,前两阶模态小于 60 Hz,这限制了跟踪架的控制带宽。粗跟踪和精跟踪两路光学系统均采用传统卡式反射系统,主镜的有效通光口径大于 300 mm,采用碳化硅轻量化设计。其他系统根据配重原则采用对称和模块化设计。

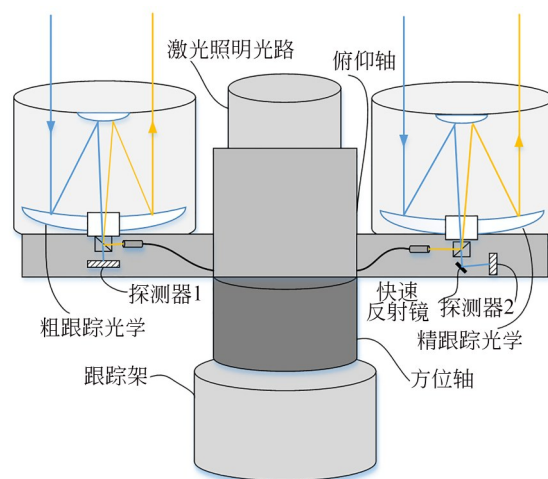


图 3 复合轴精密跟踪系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of composite axis precision tracking system

T 型跟踪架方位轴和俯仰轴采用力矩电机直驱的方式,测角元件采用 32 位绝对式编码器,可以实现转动位置的实时反馈。但是轻量化结构设计引起低机械谐振,跟踪架控制精度有限,不能达到激光通信的精度要求,因此采用复合轴控制策略。粗跟踪光学系统通过跟踪架将已知轨道数据作为前馈引导,由计算机输出合作目标的位置和速度信息引导跟踪架进行指向,目前的结构形式控制精度只能达到 20" 左右。为了克服大气湍流、地基振动等高频噪声的影响,在望远镜光路里采用小视场快速反射镜可以实现带宽

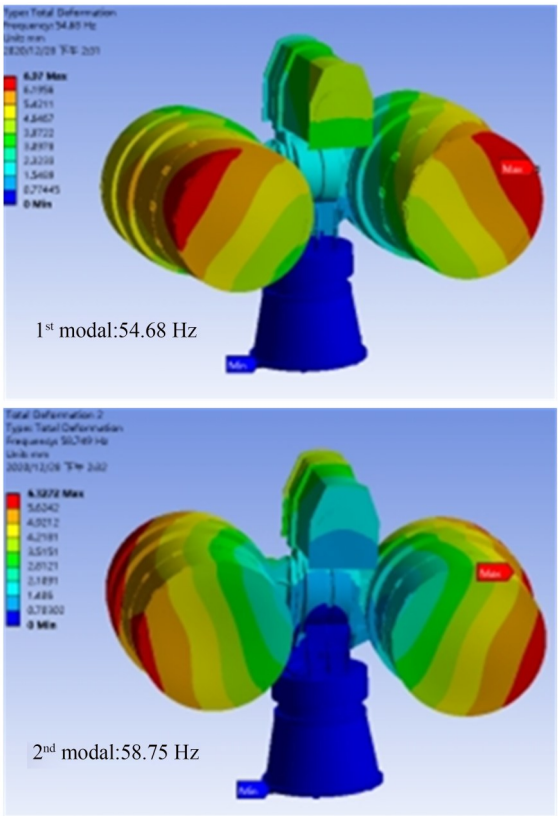


图 4 轻量化跟踪架结构前 2 阶模态

Fig. 4 Schematic model of 1st and 2nd modal diagram of the light-weighting gimbal terminal

高的补偿能力,从而抑制跟踪架的残余低频扰动和
高频噪声,这种组合式控制系统为复合轴跟踪
系统。

复合轴跟踪系统是多变量控制系统中的二
维关联控制系统的一种模式。多变量控制系统
在结构上有关联性,按照系统输出端的变量来定
义。如果单变量输出的变化影响其他输出,则该
系统是关联系统;如果不影响其他输出,则为解
耦系统。本文采用的复合轴精密跟踪系统控制
框图如图 5 所示。

该复合轴跟踪系统采用双探测器,粗跟踪探
测器负责对跟踪架的闭环反馈,精跟踪探测器负
责对快速反射镜的闭环反馈。当粗跟踪光学跟
踪误差大于精跟踪光学视场时,精跟踪控制子系
统处于原始标定位置;当粗跟踪光学跟踪误差小
于精跟踪光学视场时,精跟踪子系统转入快速反
射镜闭环跟踪,从而起到跟踪架主系统残余跟踪
误差的作用。为了实现高带宽控制,选用基于压
电陶瓷驱动的快速反射镜^[8-9]。

压电陶瓷驱动的快速反射镜如图 6 所示,由
于结构紧凑和反射镜转动惯量小,它可以实现高
控制带宽。快速反射镜控制模型可简化为二阶
惯性系统,其控制传递函数为:

$$G_F(s) = \frac{k_F}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (1)$$

式中: k_F 为快速反射镜的合成机械电气常数, ξ 为
控制系统阻尼系数, ω_n 为谐振频率对应的角
频率。

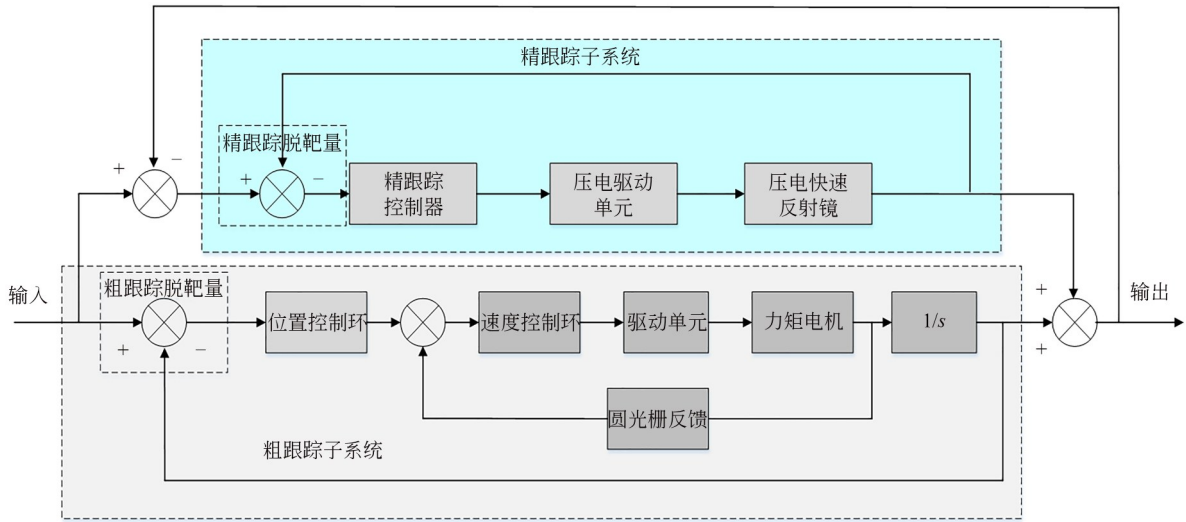


图 5 复合轴精密跟踪系统控制框图

Fig. 5 Block diagram of control model for composite axis precision tracking system

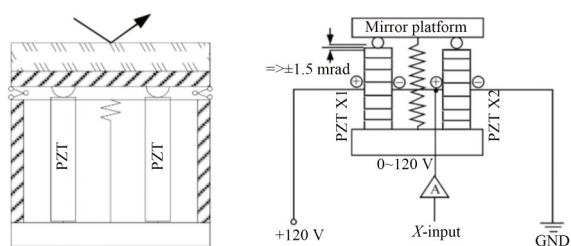


图 6 快速反射镜结构及驱动示意图

Fig. 6 Schematic diagram of structural and driving model of fast steering mirror

4 高精度跟踪指向控制策略

复合轴控制是目前实现高精度跟瞄的重要策略^[10-12]。粗跟踪驱动跟踪架实现较大范围的转

动,但是受限于谐振频率,其控制带宽较低,难以实现通信跟踪精度的需求。精跟踪利用快速反射镜的高谐振特性,控制带宽更高,对粗跟踪的残余误差进行补偿。因此,采用复合轴控制测量既能保证对目标的捕获跟踪,又能提高跟踪精度^[13-14]。

精跟踪控制子系统主要由控制器、电压放大电路、压电陶瓷快速反射镜和高帧频相机等组成。高帧频相机对目标光斑进行识别、提取,生成脱靶量数据,控制器根据脱靶量数据计算生成电压控制量,电压放大电路将电压控制量进行放大以驱动压电快速反射镜进行偏转,控制框图如图 7 所示。

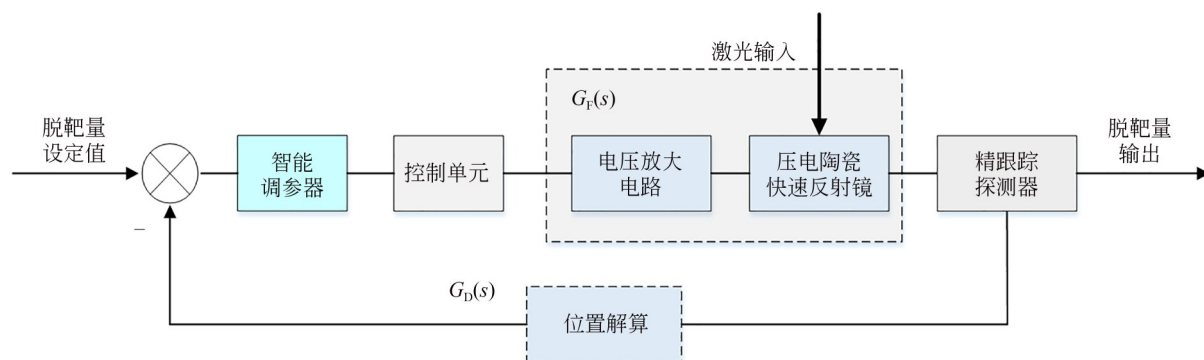


图 7 精跟踪闭环控制系统结构

Fig. 7 Schematic diagram of fine precision tracking closed loop control system

精跟踪子系统的工作步骤如下:(1)入射光经精跟踪快速反射镜反射进入精跟踪探测器,并将光成像到相机探测器的像面上;(2)通过图像处理单元对光斑进行识别和提取,并解算出光斑脱靶量;(3)将转换后的脱靶量数据经智能调参解算优化后,导入精跟踪控制单元进行数字处理并将结果送入电压放大电路,放大后的电压驱动快速反射镜偏转,使成像光斑始终位于精跟踪探测器像面的目标位置^[15-16]。

压电快速反射镜系统的传递函数 $G_F(s)$,以及精跟踪探测器的传递函数 $G_D(s)$ 可简化为一阶惯性环节,即:

$$G_D(s) = \frac{1}{T_e s + 1}. \quad (2)$$

复合轴跟踪系统精跟踪子系统控制算法选用智能调参PID数字控制算法进行光闭环控制。智能调参PID控制由比例,微分和积分3个部分组成。

智能调参PID控制算法结合机器学习算法对目标误差进行识别分类,再结合传统PID控制方法,使得参数调节更加智能,调参时间缩短。由于控制对象是在低速稳定跟踪区间的线性系统,通过设计一个多输入多输出控制模型,可以采用迭代反馈调谐的方法更新PID控制参数。首先,通过主成分分析(Principle Component Analysis, PCA)提取控制模型中灵敏度较高的参数,从而减少迭代反馈调谐的复杂度,使用区间线性多变量计算模型可以保证控制过程的稳定性,同时不降低系统控制带宽。智能算法主要是基于深度学习

的神经网络参数分类算法,结合 PCA 进行 auto-tuning 参数确定,如图 8 所示。

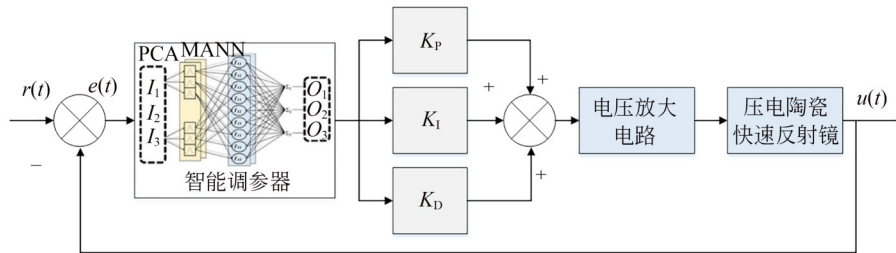


图 8 智能调参 PID 数字控制算法框图

Fig. 8 Schematic diagram of intelligence tuning PID digital control algorithm

根据 PID 控制原理,其系统响应与反馈信号的采样频率之间有着非常密切的关系,数字 PID 表达式如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (3)$$

其中: $e(t)$ 代表输入误差,即输入信号与输出反馈信号的差值, $u(t)$ 表示系统输出量, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。微分参数在控制系统中是根据误差的变化率来调节的,能够修正信号,从而使系统更快地做出反应,减少调节时间,起着超前调节的作用。比例参数在控制系统中是根据误差进行调节的,作用是减少偏差。积分参数在控制系统中是根据误差积累量来调节的,作用是消除系统积累误差^[17-18]。

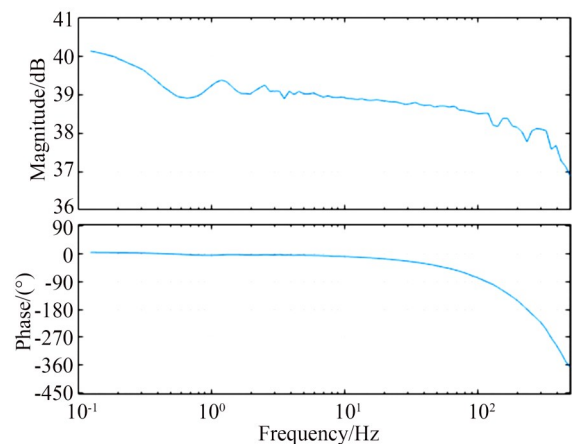
智能调参 PID 控制方法根据信号输入和输出的反馈值求得偏差值,然后通过比例、微分和积分 3 个环节对偏差值进行调节,从而达到控制输入信号的目的。将上述实验过程进行离散化处理,可得出智能调参 PID 数字控制器的数学表达式:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \right], \quad (4)$$

式中: $u(k)$ 为 k 次采样后系统的输出值, T 为系统的采样周期, $e(k)$ 为第 k 次采样的输入误差。

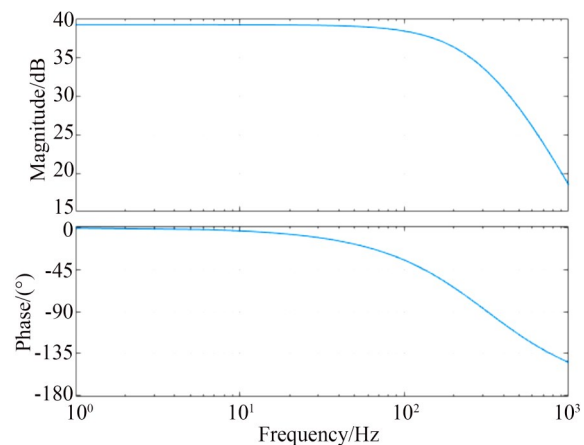
根据传递函数特性,将精跟踪系统近似为一个二阶系统。通过控制器产生正弦扫频信号,驱动快速反射镜进行扫频输入输出数据记录。对

扫频数据进行傅里叶变换和频率特性拟合,获得精跟踪控制系统的开环频率特性伯德图,如图 9 所示。



(a) 实际扫频传递函数伯德图

(a) Bode plot of actual sweep frequency transfer function



(b) 近似传递函数伯德图

(b) Bode plot of approximate transfer function

图 9 精跟踪子系统开环伯德图

Fig. 9 Open Bode plot of fine precision tracking sub system

根据传递函数搭建仿真模型,引入PID控制并进行闭环扫频,得到精跟踪系统闭环伯德图,如图10所示。由于受到精跟踪相机的帧频限制,系统闭环带宽取53.46 Hz。

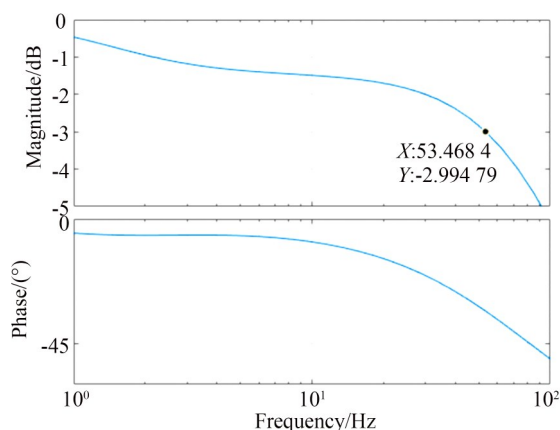


图10 精跟踪子系统闭环伯德图

Fig. 10 Closed loop Bode diagram of fine precision tracking sub system

5 实 验

根据上述轻量化结构设计和跟瞄控制算法的复合轴跟踪系统进行了现场的星地激光通信外场测试。通过数据引导的方式对卫星目标进行捕获,卫星过境时间约8 min,捕获到下行信标光后进行高精度跟踪,达到跟踪精度后,星地通信链路建立,开始进行激光通信。编码器记录的卫星运动轨迹如图11所示,方位轴转动角度约为 150° ,俯仰轴转动角度约为 40° ,方位轴转动速度不超过 $1^\circ/\text{s}$,俯仰轴转动速度不超过 $0.5^\circ/\text{s}$,属于慢速跟踪过程。实际的激光通信窗口时间远小于数据采集的轨迹时间。

通过引导数据和粗跟踪探测器的脱靶量数据,可以得到粗跟踪动态误差,跟踪误差数据截取近似通信窗口时间周期内的部分数据,如图12所示。由粗跟踪误差数据可知,跟踪架粗跟踪精度方位轴转动误差的标准差 $\sigma_{a1}=4''$,俯仰轴转动误差的标准差 $\sigma_{e1}=6.3''$,其方位轴跟踪误差峰峰值达到 $22''$,俯仰轴跟踪误差峰峰值达到

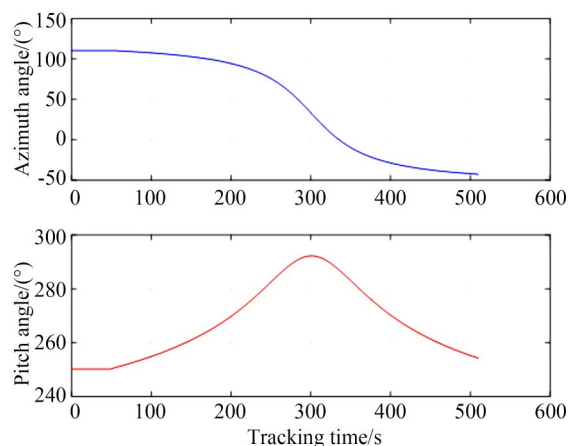


图11 跟踪架子系统跟踪轨迹

Fig. 11 Tracking trajectory of gimbal coarse tracking sub system

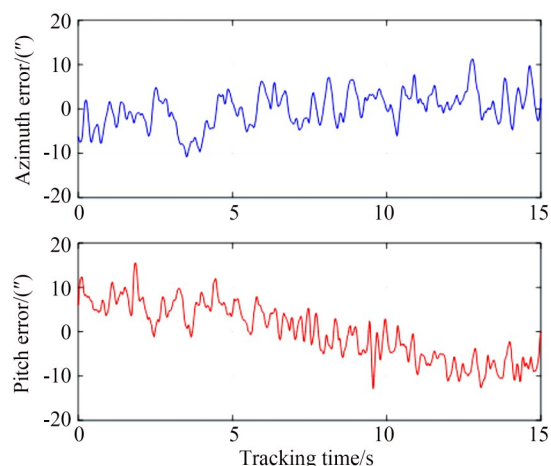


图12 跟踪架子系统的闭环控制精度

Fig. 12 Closed loop control accuracy of gimbal coarse tracking sub system

$28''$ 。根据激光通信要求,这个误差等级不能满足信息传输的要求。

根据误差数据进一步分析粗跟踪的误差频率成分,如图13所示,存在小于5 Hz的低频干扰成分。

为了提高该轻量化量子跟踪系统的跟踪精度,进行了精跟踪分系统测试,采集部分时间的静态跟踪误差后,得到快速反射镜的静态误差分别为:方位轴转动误差的标准差 $\sigma_{a0}=0.8''$,俯仰轴转动误差的标准差 $\sigma_{e0}=0.7''$,如图14所示,基本达到快速反射镜实验室条件下的测试精度。

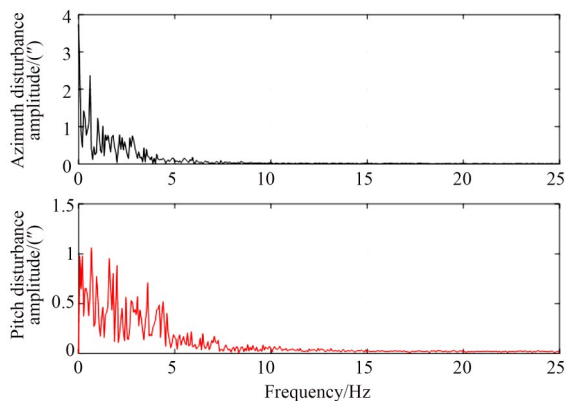


图 13 跟踪架子系统的频率特性

Fig. 13 Frequency characteristics of gimbal coarse tracking sub system

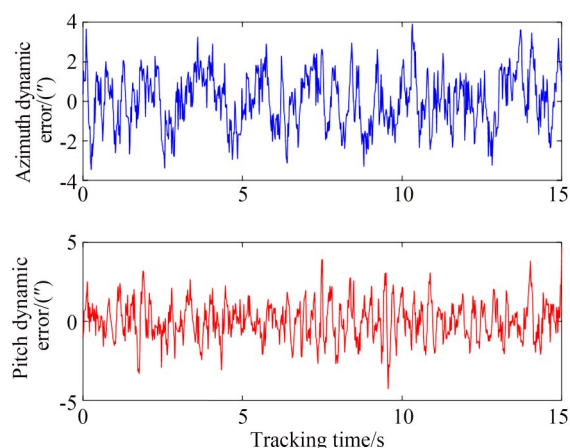


图 15 精跟踪子系统的动态闭环跟踪精度

Fig. 15 Dynamic closed loop control accuracy of fine precision tracking sub system

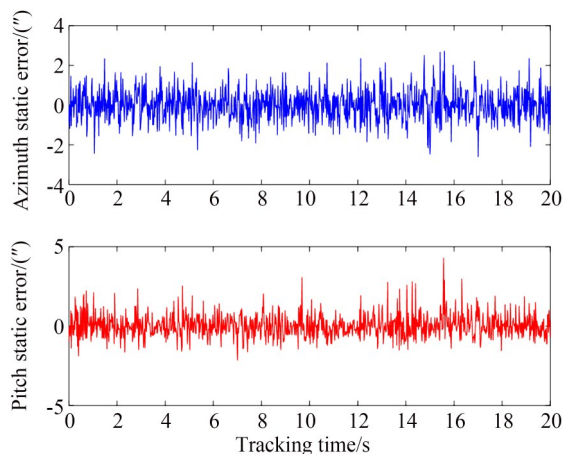


图 14 精跟踪子系统的静态闭环跟踪精度

Fig. 14 Static closed loop control accuracy of fine precision tracking sub system

在动态对准和跟踪过程中,获取通信时间窗口的精跟踪子系统探测器的实际脱靶量数据误差,如图 15 所示。精跟踪子系统开启后复合轴控制的综合误差达到:方位轴运动误差的标准差 $\sigma_{a2} = 1.4''$,俯仰轴运动误差的标准差 $\sigma_{e2} = 1.2''$ 。频率成分小于 5 Hz 的低频误差依然存在,但是得到了一定程度的抑制,如图 16 所示。由测试结果可知,该复合控制系统已经满足星地激光通信量子加密传输的跟踪精度要求,在与“济南一号”星载模块开展的联合量子通信实验中,实现了 10 s 通信窗口内获取 10 Mb 的有效成码率,满足通信数据质量要求。

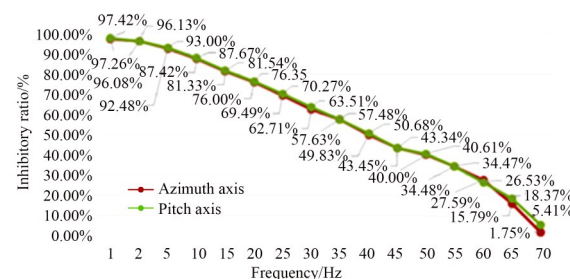


图 16 复合轴精跟踪的低频扰动抑制效果

Fig. 16 Low-frequency disturbance suppression effect of composite axis fine tracking system

6 结 论

本文针对轻量化激光通信地面跟踪系统设计复合轴跟踪技术,通过设计便于布站的轻量化跟踪架系统,结合高带宽快速反射镜控制,使很窄的激光束能够在两个终端之间准确对准并进行高精度跟踪。目前,基于量子加密的高带宽激光通信技术成为国内比较先进的信息传输方式。跟踪实验结果表明,轻量化地面跟踪光学终端采用复合轴控制的方法具有可行性,控制带宽可以达到跟踪架谐振频率附近 50 Hz 以上,跟踪精度可以提高 4 倍以上,接近 $1''(1\sigma)$,对地面振动和大气湍流等通信干扰有很好的抑制作用。本研究采用低质量和低功耗的终端来提供更高带宽和可靠的数据传输,具有很好的安全保密性和抗干扰能力。

参考文献:

- [1] GUELMAN M, KOGAN A, KAZARIAN A, *et al.* Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communications [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2004, 40(4): 1239-1248.
- [2] 李聪, 倪小龙, 于信, 等. 500mm 口径星地激光通信地面接收端系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 210-219.
LI C, NI X L, YU X, *et al.* Design of ground receiver system for 500 mm aperture satellite-ground laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(7): 210-219. (in Chinese)
- [3] SHRESTHA A, BRECHTELSBAUER M. Transportable optical ground station for high-speed free-space laser communication[C]. *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans. San Diego, California, USA. SPIE*, 2012, 8517, 851706-1:9.
- [4] 闫爱民, 周煜, 孙建锋, 等. 卫星激光通信复合轴光跟踪技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 40601.
YAN A M, ZHOU Y, SUN J F, *et al.* Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 40601. (in Chinese)
- [5] GILLMER R. Demonstration of a modular, scalable, laser communication terminal for manned spaceflight missions [J]. *Proc. of SPIE*, 2021, 11816OE:6.
- [6] ANTONELLO R, BRANZ F, SANSONE F, *et al.* High-precision dual-stage pointing mechanism for miniature satellite laser communication terminals [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(1): 776-785.
- [7] 康永斌, 艾志伟, 陈振荣, 等. 两轴水平框架式粗跟踪结构及其控制系统设计[J]. 红外技术, 2022, 44(7): 732-740.
KANG Y B, AI ZH W, CHEN ZH R, *et al.* Structure and control system design for two axes horizontal coarse tracking frame [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(7): 732-740. (in Chinese)
- [8] 文江华, 等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(8): 59-64.
WEN J H, *et al.* Study of driving and controlling with fast steering mirror based on PZT [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(8): 59-64. (in Chinese)
- [9] FANG C, GUO J, YANG G Q, *et al.* Design and performance test of a two-axis fast steering mirror driven by piezoelectric actuators[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(5): 333-336.
- [10] 杨光海, 王宏宇, 周通, 等. 高精度光电伺服稳定平台控制技术[J]. 兵工自动化, 2021, 40(8): 9-11, 29.
YANG G H, WANG H Y, ZHOU T, *et al.* Control technology of high-precision photoelectric servo stabilization platforms [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2021, 40(8): 9-11, 29. (in Chinese)
- [11] 马佳光, 唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 218-227.
MA J G, TANG T. Review of compound axis servomechanism tracking control technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 218-227. (in Chinese)
- [12] DONG Y H, LIU H S, LUO Z R, *et al.* Principle demonstration of fine pointing control system for inter-satellite laser communication [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(3): 449-453.
- [13] 唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术的研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200315.
TANG T, MA J G, CHEN H B, *et al.* A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200315. (in Chinese)
- [14] ZHANG F R, RUAN P, HAN J F. Optical path pointing error and coaxiality analysis of APT system of space laser communication terminal [J]. *Optica Applicata*, 2021, 51(2): 203-222.
- [15] TAKAYAMA Y, JONO T, TOYOSHIMA M, *et al.* Tracking and pointing characteristics of OICETS optical terminal in communication demonstrations with ground stations[C]. *Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves. San Jose, CA. SPIE*, 2007: 1-9.
- [16] 马佳光. 复合控制及等效复合控制原理及应用[J]. 光学工程, 1988, 15(5): 1-16.
MA J G. Principles and applications of combined control and equivalent combined control [J]. *Opto-*

- Electronic Engineering*, 1988, 15(5): 1-16. (in Chinese)
- [17] 赵子菁, 刘彦甫, 赵宏超, 等. 基于复合轴控制原理的卫星新型姿态稳定性调控[J]. 光学精密工程, 2023, 31(23): 3438-3448.
- ZHAO Z J, LIU Y F, ZHAO H CH, *et al.* Pointing stability control method for super stable satellite based on composite axis control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(23): 3438-3448. (in Chinese)
- [18] 李剑, 赵祥杰, 张大勇. 国外转塔式光电瞄准吊舱技术发展分析[J]. 光学精密工程, 2024, 32(16): 2474-2491.
- LI J, ZHAO X J, ZHANG D Y. Development analysis of overseas EO targeting turret technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(16): 2474-2491. (in Chinese)

作者简介:



于帅北(1978—),男,吉林长春人,副研究员,2002年于吉林大学获得学士学位,主要从事光机结构的研究。E-mail: 22596939@qq.com

通讯作者:



曹艳波(1984—),男,湖北黄石人,副研究员,2007年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2009年于华中科技大学获得硕士学位,现为广东省季华实验室光电科学与技术研究部副主任,主要从事激光与光学系统的研究。E-mail: caoyb@jihualab.ac.cn