

激光与光电子学进展

空间激光通信粗跟踪等效复合控制技术

胡一博^{1,2}, 孟立新^{1,2}, 白杨杨^{1,2*}, 张立中^{1,2}, 姜兴^{1,2}, 郑国和^{1,2}, 刘智²¹长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学空地激光通信国防重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 在激光通信光端机伺服控制中, 基于速度、加速度滞后补偿的等效复合控制技术能够大幅提高光端机的跟踪精度, 同时对系统稳定性影响较小。本文首先建立了卫星激光通信光端机双向跟踪模型, 分析了光端机工作扰动来源, 解算出运动和扰动的等效正弦信号, 在速度、位置双回路闭环控制的基础上, 开展了等效复合控制技术研究; 通过对控制参数进行基于方差的敏感度分析, 完成了速度、加速度滞后补偿参数的优化设计; 最后在室内构建了实验系统, 完成了仿真分析和实验验证。实验结果表明, 采用等效复合控制后, 在双端运动状态下, 跟踪误差为 56.8 μrad , 误差减小了 80.06%, 大幅提高了光端机粗跟踪动态的跟踪精度。

关键词 光通信; 卫星激光通信; 等效复合控制; 参数优化; 敏感度分析

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220781

Coarse Tracking Equivalent Compound Control Technology for Space Laser Communication

Hu Yibo^{1,2}, Meng Lixin^{1,2}, Bai Yangyang^{1,2*}, Zhang Lizhong^{1,2}, Jiang Xing^{1,2}, Zheng Guohe^{1,2}, Liu Zhi²¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²National Defense Key Laboratory of Air Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In the servomechanism control of laser communication optical transceivers, the equivalent compound control technology based on speed and acceleration lag compensation greatly improves the tracking as well as aiming accuracy of the optical transceiver while having little impact on the system stability. First, this study establishes the two-way tracking and aiming model for the satellite laser communication terminal, and thereafter analyzes the source of working disturbance on the optical terminal leading to solve the equivalent sinusoidal signal of motion and disturbance. Based on the double-loop closed-loop control of speed and position, the study of equivalent compound control technology is carried out. Through the variance-based sensitivity analysis of control parameters, the optimal design of speed and acceleration lag compensation parameters is completed. Finally, a motion simulation experiment is performed indoors for simulation analysis and experimental verification. The results show that after adopting the equivalent compound control, the tracking accuracy is 56.8 μrad in the state of double-end motion and the accuracy error is reduced by 80.06%. This suggests that the equivalent compound control technology can greatly improve the dynamic tracking accuracy of rough tracking of the optical transceiver.

Key words optical communication; satellite laser communication; equivalent compound control; parameter optimization; sensitivity analysis

1 引言

目前, 空间激光通信组网是继点对点激光通信之

后, 更为实用化的通信方式^[1], 国内外相关机构均对激光通信组网技术进行了深入研究, 例如美国 OPALS 星地激光通信实验和日本双轨道激光通信组网研

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-26; 录用日期: 2022-03-10; 网络首发日期: 2022-03-20

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“叶企孙”科学基金(U2141231)、吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20210836KJ)

通信作者: byy_cust@163.com

究^[2-3]。国内长春理工大学提出基于反射镜拼接光学天线的组网通信技术方案,在室内实现了一对二空间激光通信;2020年,长春理工大学与武汉大学等单位在西藏完成艇载、机载多节点空间激光通信^[4]。随后提出一对四组网通信新方案,其优点是结构简单、小型化,但在动基座下对伺服控制精度有着较高要求^[5]。

星间组网通信时,主光端机和从光端机通信距离远,双星之间跟踪过程为低速跟踪过程,在工作中受引力、辐射压力影响,跟踪误差主要来自于卫星机械运动等因素所造成的振动^[6],因此光端机跟瞄过程中,稳定性和动态性能成为衡量伺服系统性能的重要指标。日本光学轨道通信工程试验卫星计划中,粗跟踪精度优于 $520\ \mu\text{rad}$ ^[7],国内卫星光通信(IOC)粗跟踪系统最大跟踪误差设计要求一般小于 $300\ \mu\text{rad}$ ^[8]。传统的比例积分微分(PID)控制难以满足目前高精度的要求,而现代智能控制算法如遗传算法、神经网络控制、模糊控制等在工程应用中难以实现^[9]。

本文优选经典超前滞后校正控制策略,经仿真测试与实验验证,在满足系统稳定性的前提下,跟踪精度无法达到设计要求,因此,如何在不变原有校正控制系统参数与稳定性的前提下,进一步提升跟踪精度,是实现空间激光通信组网的前提和保障。本文进一步引入等效复合控制策略,在对速度和位置回路进行频域校正设计后,结合速度滞后补偿和加速度滞后补偿方式,构造等效复合控制系统,通过对补偿参数开展基于

方差的敏感度分析,确定合理的参数,从而满足光端机链路建立与保持所需要的跟踪精度要求。

2 系统组成与建模

2.1 激光通信组网粗跟踪系统组成原理

空间激光通信组网工作示意图如图 1 所示,主光端机所在卫星平台和搭载着四台从光端机的卫星分布在两条轨道上,位于中心的主光端机可同时与位于四周的四台从光端机构建一对四空间激光通信链路。

主光端机作为通信中枢,通过自身四组光学天线,实现与四台从光端机之间的通信。主光端机及主端光学系统如图 2 所示。

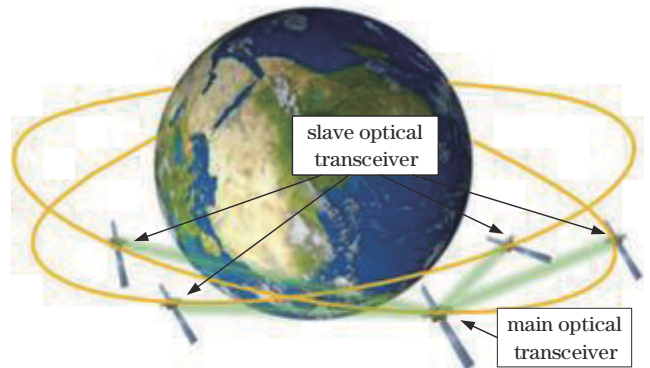


图 1 空间激光通信一对四组网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-to-four networking of space laser communication

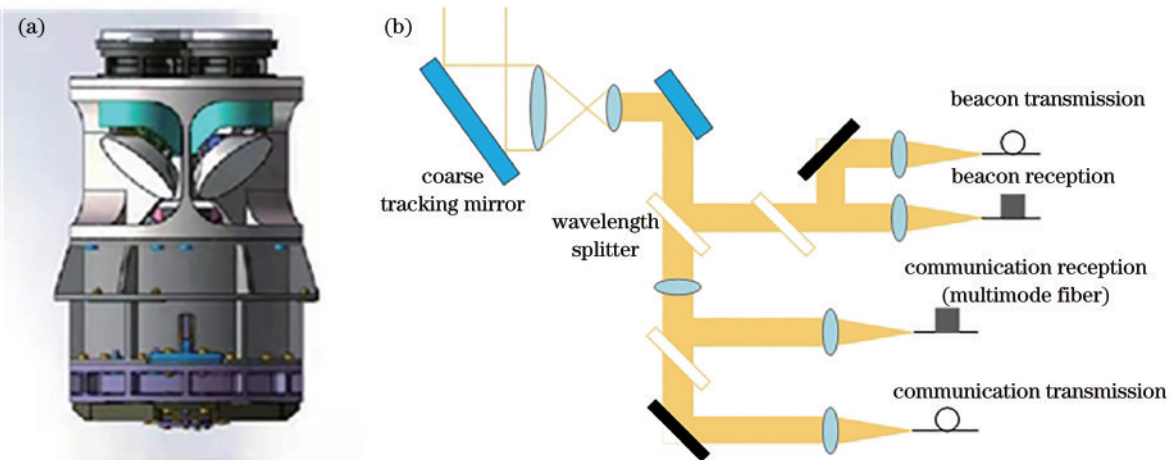


图 2 主光端机及其光学系统示意图。(a) 主光端机外形图;(b) 光学系统示意图(单路)

Fig. 2 Schematic diagram of main optical transceiver and its optical system. (a) Outline drawing of main optical transceiver; (b) schematic diagram of optical system (single path)

主光端机粗跟踪由四个可二维转动的平面单反射镜拼接而成,可实现方位 360° 、俯仰 30° 范围内的目标跟踪与对准。信标光和通信光经反射镜反射后进入透射式天线,实现缩束,再经过精跟踪稳定后,进一步提高光束对准精度,由波长分光片进行分光与合束,实现信标光和通信光的发射与接收。四路跟瞄回路相对独立,通信收发系统通过路由交换信息,实现一对四组网

通信,链路波长分配如表 1 所示。粗跟踪作为链路建立的基础,在整个链路中起着至关重要的作用,因此,本文以主光端机和其中一台从光端机间的粗跟踪系统为例开展研究,重点研究如何提高粗跟踪精度。

2.2 动态模型建立

空间激光通信光端机载体卫星为地球近地轨道卫星,飞行高度为 $800\ \text{km}$,轨道夹角 30° ,通信距离为 $200\sim$

表 1 主、从光端机通信波长

Table 1 Wavelengths for communication between main and slave optical transceivers unit: nm

	Beacon light band	Communication optical band
Main optical transceiver	810	1550
Slave optical transceiver	850	1530

1000 km, 为在实验室内模拟链路建立、跟踪和通信过程, 使用滑轨和转台模拟卫星相对运动, 如图 3 所示。

首先, 根据轨道参数确定滑台的运动参数, 如图 4 (a) 所示, 设定从光端机滑台轨道长度 $L = 1000 \text{ mm}$, 倾斜 45° 放置, 最大相对运动角速度为 $0.3^\circ/\text{s}$, 主光端机到从光端机滑台距离为 $H = 1500 \text{ mm}$, 因此滑台速度 $V = 11 \text{ mm/s}$ 。主光端机方位角速度曲线和方位角加速度曲线如图 4 (b) 所示, 其最大角速度 $\dot{\theta}_{\max} = 3 \text{ rad/s}$, 最大角加速度为 $\ddot{\theta}_{\max} = 0.001 \text{ rad/s}^2$ 。

根据最大角速度和角加速度进行等效正弦计算, 得运动姿态等效函数为 $\theta_1(t) = 90 \sin(0.003t)$, 作为测试粗跟踪精度的输入。

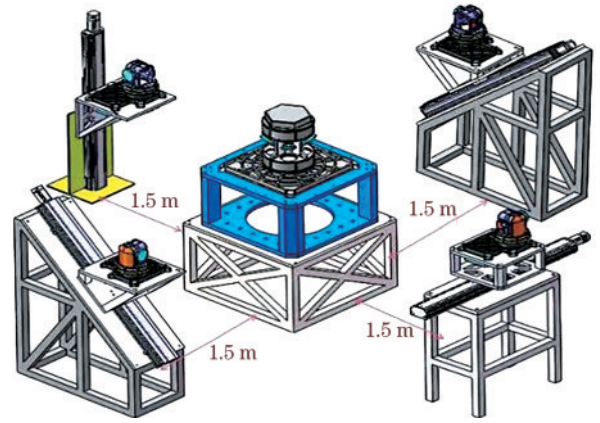


图 3 空间激光通信一对四组网现场布局示意图
Fig. 3 Layout diagram of one-to-four networking of space laser communication

此外卫星平台在工作过程中, 会受到推力运动、自身机械运动、微小陨石影响等高频扰动, 以及卫星摄动、太阳能压力等低频扰动^[10]。将平台所受扰动和振动等干扰因素采用最大角速度为 $1^\circ/\text{s}$ 、最大角加速度为 $1^\circ/\text{s}^2$ 的等效正弦模拟^[11], 作为测试主光端机粗跟踪精度的另一输入条件。

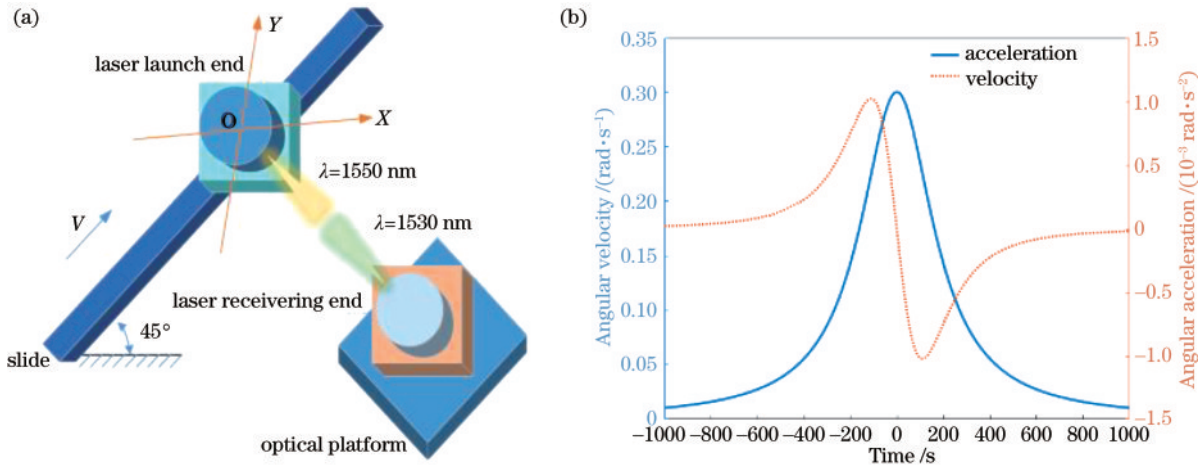


图 4 动态建模分析。(a)空间激光通信一对一实验原理图;(b)角运动速度、加速度变化图

Fig. 4 Dynamic modeling analysis. (a) Schematic diagram of one-to-one experiment of space laser communication; (b) diagram of angular velocity and angular acceleration change

3 速度回路及位置回路设计

主光端机伺服系统采用速度回路作为内回路、位置回路作为外回路的双闭环系统, 方位电机采用 Alliedmotion 公司生产的型号为 MF0060008-A00-Z 的直流无刷力矩电机。为辨识出系统传递函数, 对系统输入幅值固定、频率随时间变化的正弦信号, 对测得的反馈信号进行辨识, 得到方位轴系的开环传递函数为

$$\frac{0.63}{(0.69s + 1)(0.008s + 1)}, \quad (1)$$

式中, s 为拉普拉斯变化后的复参变量。频域校正通过

配置零极点数量从而改善频域指标; 在开环截止频率一致的前提下, 相对于传统 PID 控制, 频域校正后的 I 型系统低频增益效果更佳^[8], 因此使用更加灵活, 可大幅改善被控对象的性能。

速度环路作为内环路, 阶次比外环路低, 为保证系统抗干扰能力, 内环路需较大的增益, 从而在串联控制中, 较大的内环增益将提高外环路开环增益, 增加系统相位裕度, 从而提高系统抗干扰能力。因此速度环校正环节采用串联超前滞后校正方式, 其传递函数 $G_v(s)$ 为

$$G_v(s) = k_v \frac{(T_{v1}s + 1)(T_{v2}s + 1)}{(T_{v3}s + 1)(T_{v4}s + 1)}, \quad (2)$$

式中： k_v 为增益系数； T_{v1} 、 T_{v2} 、 T_{v3} 、 T_{v4} 为超前滞后部分的修正参数。由扫频得知系统谐振频率 $f_R = 110$ Hz，因此闭环带宽 $f_v = (1/3 \sim 1/2) f_R = 50$ Hz。根据内外环带宽匹配原则，取校正后速度开环截止频率 24 Hz，相角裕度 $\gamma_v = 60^\circ$ ，经理论计算与仿真后校正环节为

$$G_v(s) = 1600 \frac{(0.025s + 1)(0.008s + 1)}{(0.25s + 1)(0.001s + 1)} \quad (3)$$

图 5 为校正后速度环幅频特性曲线，系统开环截止频率为 23.8 Hz，相角裕度为 68.6° 时，系统稳定；系统闭环带宽为 39.7 Hz，符合设计要求。

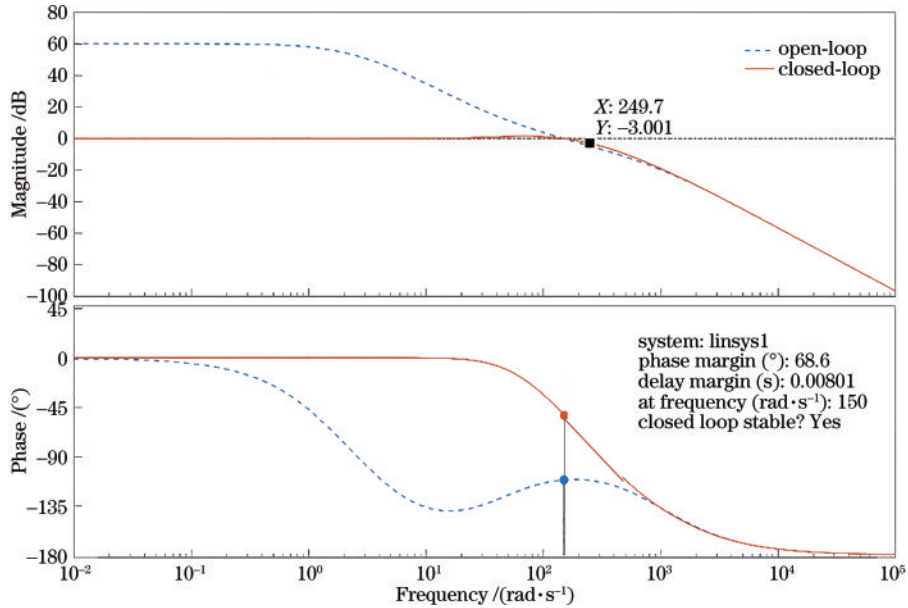


图 5 速度环幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic curve of speed loop

系统位置环用于保障系统跟瞄精度和控制动态性能，考虑到内外环路带宽匹配原则，在速度环带宽 39.7 Hz 的前提下，设计位置回路带宽为 7 Hz，并采用 I 型系统以确保系统稳定性。

设计时，为了更精确地模拟主光端机跟踪瞄准的状态，在设计位置回路时加入 CCD 相机延迟环节和采

样保持环节，从而真实地模拟相机图形信号建立、传输所造成的延迟，以及刷新率导致的帧图保持时间。由于速度回路校正效果较为理想，因此位置回路校正函数为一个增益环节 $G_p(s) = k_p$ 。

经过计算，增益 $k_p = 20$ 。位置回路经校正放大后的伯德图如图 6 所示，截止频率为 3.34 Hz，相角裕度

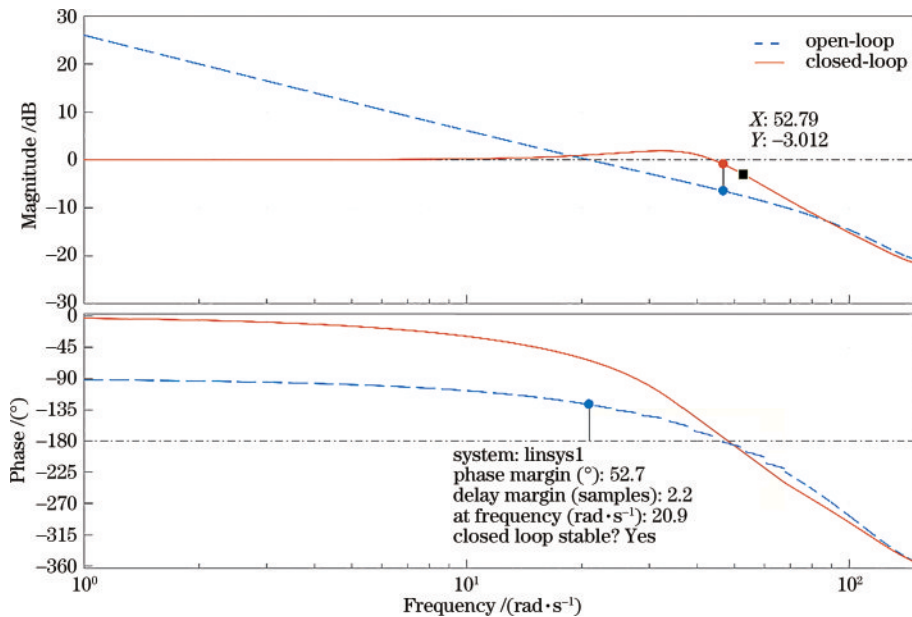


图 6 位置环幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic curve of position loop

为 70.5° , 满足系统稳定条件; 系统闭环带宽为 7.2 Hz , 符合设计要求。

通过以上速度回路和位置回路的校正设计, 在保证系统稳定性、快速性的前提下, 施加运动姿态等效正弦 $\theta_1(t)$ 和最大角速度为 $1^\circ/\text{s}$ 、最大角加速度为 $1^\circ/\text{s}^2$ 的模拟扰动信号所合成的叠加信号作为输入信号, 进行稳态跟踪测试。测得跟踪误差为 $1109 \mu\text{rad}$, 不满足系统跟踪误差指标, 因此系统需要进行速度、加速度补偿的等效复合控制。

4 基于等效复合控制的跟瞄回路设计

目前, 提高光端机跟瞄的伺服系统设计方法如模

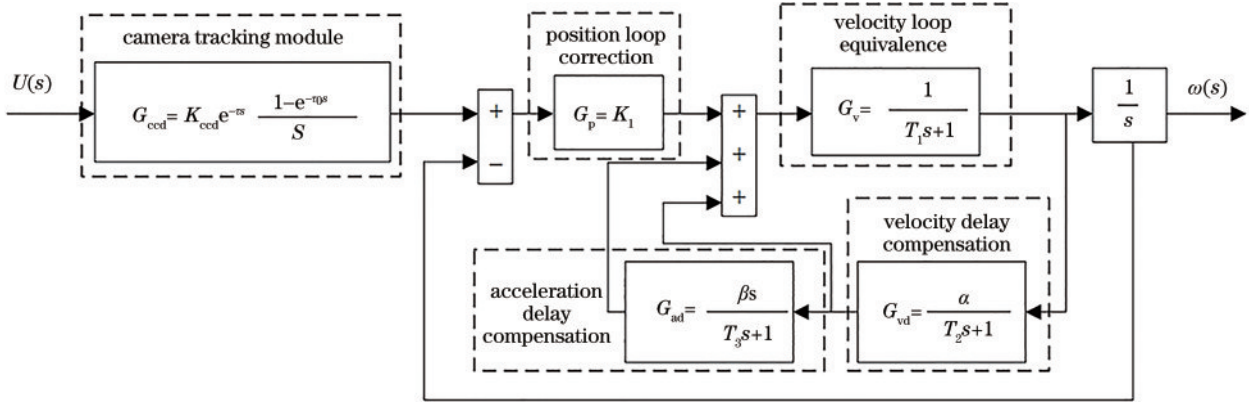


图 7 跟踪系统模型框图

Fig. 7 Block diagram of tracking system model

文献[14]通过系统输入量配合误差传递函数, 推导出误差值对参数 β 和 T_3 的关系式, 通过对 β 和 T_3 求偏导令其为零, 从而解得参数最优值。但实际应用时输入信号由于各种扰动, 很难等效成完美的正弦信号, 对实际工程调试的参考价值有限。

针对上述问题, 本文使用基于方差的参数敏感度分析方法, 将跟踪精度作为参考, 对速度补偿参数和加速度补偿参数进行一阶指数和全局敏感性分析。在理论分析的基础上, 有针对性地进行参数选择和调试。

4.1 基于方差的参数敏感度设计

在工程实际运用中, 为了给设计调试参数以参考和指导, 本文对速度补偿参数和加速度补偿参数对于跟踪精度的敏感度进行对比分析。基于方差的参数敏感度分析法是最典型的全局敏感度分析法[15], 能够处理复杂的非线性参数间的关系, 本文分别对速度、加速度补偿参数进行分析。

分别对速度补偿参数 T_2 、 α 和加速度补偿参数 T_3 、 β 进行采样并生成样本矩阵, 将系统函数视为一个黑盒, 将参数作为输入量, 得到对应 \mathbf{X} 值矩阵, 将误差精度作为输出量, 得到对应的 \mathbf{Y} 值矩阵。一阶影响指数公式为

糊控制、神经网络等控制策略, 都缺乏实际应用条件或是使用过程较为繁琐复杂, 传统的控制策略如前馈补偿存在扰动大、精度不够等问题。

本文将速度、加速度补偿引入空间激光通信的光端机跟瞄伺服回路中, 构成等效复合控制, 同时不会降低系统的稳定性能[12]。将校正过的速度闭环传递函数等效成一个惯性环节 $G_v = \frac{1}{T_1 s + 1}$, 跟踪系统如图 7 所示。

目前在选择速度、加速度滞后补偿参数时, 文献[13]使用经验法, 先取 $T_2 = T_1$, 随后对 α 进行设计; 这种方法有一定合理性, 但是易陷入局部最优解, 从而无法挖掘系统最佳性能。

$$S_i = \frac{V_{X_i} [E_{X_i} (Y|X_i)]}{V(Y)}, \quad (4)$$

式中: S_i 为参数一阶影响指数; $V(Y)$ 为 \mathbf{Y} 值矩阵方差; $V_{X_i} [E_{X_i} (Y|X_i)]$ 为 \mathbf{X} 值矩阵方差, 其计算过程展开为

$$V_{X_i} [E_{X_i} (Y|X_i)] = \frac{1}{N} \mathbf{f}(B) \left[\mathbf{f}(AB^i)_j - \mathbf{f}(A)_j \right], \quad (5)$$

式中: N 为样本数量; $\mathbf{f}(A)$ 、 $\mathbf{f}(B)$ 、 $\mathbf{f}(AB)$ 为构造的输入量矩阵对应的输出量矩阵。总效应指数公式为

$$S_{Ti} = \frac{E_{X_i} [V_{X_i} (Y|X_i)]}{V(Y)}, \quad (6)$$

式中: S_{Ti} 为总效应指数; $E_{X_i} [V_{X_i} (Y|X_i)]$ 为 \mathbf{X} 值矩阵均值, 其展开式为

$$E_{X_i} [V_{X_i} (Y|X_i)] = \frac{1}{2N} \left[\mathbf{f}(A)_j - \mathbf{f}(AB^i)_j \right]^2. \quad (7)$$

速度滞后补偿和加速度滞后补偿两组各取 100 样本数, 分析结果如表 2 所示。

一阶指数是单独衡量单个模型输入对输出方差的贡献, 系数为正, 表示所计算变量与因素成正方向变化; 系数为负, 表示所计算变量与因素成反方向变化。只有速度补偿环节时, 一阶影响指数 α 数值为负, 因此

表 2 速度、加速度参数敏感度分析

Table 2 Sensitivity analysis of velocity and acceleration parameters

Sensitivity analysis index	Velocity delay compensation index		Acceleration delay compensation index	
	α	T_2	β	T_3
First-order index	-33.9439	9.8120	3.5998	1.8330
Total-effect index	10.2007	0.8813	2.3261	0.5594

α 数值越大,系统误差越小,精度越高。指数 T_2 数值为正,其数值越大系统误差值越大,精度越低。由总效应指数可知,相对于 T_2 ,速度补偿参数 α 敏感度更高。

在速度补偿环节设计完毕的前提下,对加速度补偿参数敏感性进行分析。由分析结果可知, β 的一阶影响指数和总效应指数皆高于 T_3 ,因此在调试设计中,应优先设计参数 β 。

4.2 基于敏感度分析的速度滞后补偿参数设计

速度信号由光栅差分后,经低通滤波后反馈至速度环输入端口,构成速度滞后补偿。加速度滞后补偿是速度滞后补偿经微分后,反馈至速度回路输入端口,进一步提高系统伺服性能。因此在设计参数时,在设定速度滞后补偿的前提下,对加速度滞后补偿参数进行分析。

回路中只有速度滞后补偿时,位置环传递函数为

$$G_{p1}(s) = \frac{K_1(T_2s + 1)}{s(1 - \alpha)(T_1s + 1)\left(\frac{T_2s}{1 - \alpha} + 1\right)}, \quad (8)$$

式中: K_1 为增益参数; T_1 、 T_2 、 α 为速度滞后补偿常量参数。系统的误差传递函数为

$$\Phi_{e1}(s) = \frac{s(1 - \alpha) + s^2(T_1 + T_2 - T_1\alpha) + s^3T_1T_2}{K_1 + s(1 - \alpha + K_1T_2) + s^2(T_1 + T_2 - T_1\alpha) + s^3T_1T_2}. \quad (9)$$

可知系统为一阶零差系统,由误差系数计算速度品质因素 k_{v1} 、加速度品质因素 k_{a1} 为

$$k_{v1} = \frac{K_1}{1 - \alpha}, \quad (10)$$

$$k_{a1} = \frac{K_1^2}{K_1(1 - \alpha)T_1 + [1 - K_1(1 - \alpha)]T_2 - (1 - \alpha)^2}, \quad (11)$$

由式(10)可知, α 和 k_{v1} 成正比例关系,从而 α 越大,系统滞后偏差越小。由式(11)可知, T_2 和 k_{a1} 成反比例关系, α 和 k_{a1} 成正相关。

在确定参数 α 和 T_2 时,参考敏感性分析结论,调试时首先对 α 数值进行设计,最后选择参数 T_2 的最优值。在等效运动正弦函数和等效扰动正弦函数的耦合输入信号下,选择时域特性的超调量指标、频域特性的稳定裕度指标和跟踪误差这三个指标,对参数 α 和 T_2 进行综合评定。图 8 是速度滞后补偿参数 α 、 T_2 分别对跟踪误差、超调量、稳定裕度的影响分析。

由仿真结果可进一步证明误差敏感性分析结果的

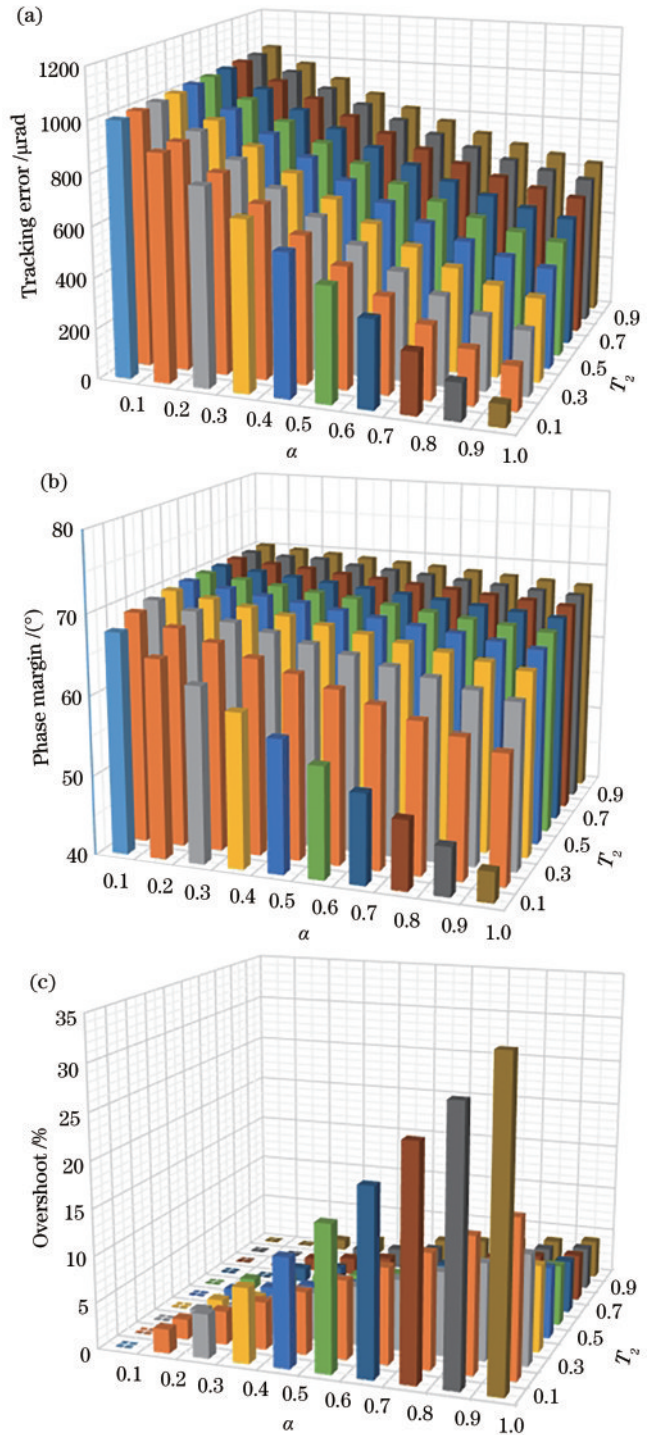


图 8 速度滞后补偿参数影响图。(a)跟踪误差;(b)相位裕度;(c)超调量

Fig. 8 Influence diagram of speed lag compensation parameters. (a) Tracking error; (b) phase margin; (c) overshoot

正确性,同时可以看出随着参数 α 的增大,系统稳定性下降,同时动态响应提高;随着参数 T_2 的增大,系统稳定性提高,但动态响应迟缓。根据系统要求综合考虑,选择 $T_2=0.3$ 、 $\alpha=0.85$ 。

系统经速度滞后补偿后稳定裕度为 62.3° ,满足跟瞄系统稳定条件;跟踪误差小于 $320\ \mu\text{rad}$,系统超调量为 9.66% ,调节时间 $t_s=0.0425\ \text{s}$,满足精度和动态性能要求。因而速度滞后补偿传递函数 G_{vd} 为

$$G_{\text{vd}}(s)=\frac{0.85}{0.3s+1} \quad (12)$$

$$\Phi_{e2}(s)=\frac{s(1-\alpha)+s^2(T_1+T_2+T_3-\alpha T_3-\alpha\beta)+\dots}{K_1+s(1-\alpha+K_1T_2+K_1T_3)+s^2(T_1+T_2+T_3+K_1T_2T_3-\alpha T_3-\alpha\beta)+\dots} \quad (14)$$

由误差系数计算速度品质因素 k_{v2} 、加速度品质因素 k_{a2} 为

$$k_{v2}=\frac{K_1}{1-\alpha} \quad (15)$$

$$k_{a2}=\frac{K_1^2}{K_1T_1+K_1\alpha T_2-K_1\alpha\beta-(1-\alpha)^2} \quad (16)$$

根据式(15)可知,带有加速度补偿的系统 k_{v2} 没有改变。同时由式(16)可以看出 k_{a2} 的大小与参数 T_3 无关,且 β 数值越大, k_{a2} 越大。为避免局部最优解问题,对加速度补偿参数进行设计分析。由参数敏感性分析可知, β 的一阶影响指数和总效应指数皆高于 T_3 ,优先选取参数 β 的最优值。图9是加速度滞后补偿参数 β 、 T_3 分别对跟踪误差、超调量、稳定裕度的影响分析。

根据图9分析结果可见,跟踪误差总体趋势随参数 T_3 、 β 增大而增大,但在 $T_3=0.5$ 、 $\beta=0.4$ 附近存在跟踪误差最低点。同时随参数 T_3 增大,系统稳定性降低,超调量增大;参数 β 增大的同时系统稳定性提高,超调量降低。考虑到系统整体的稳定性和精度要求,选择 $T_3=0.54$ 、 $\beta=0.44$ 。

系统速度、加速度滞后补偿后稳定裕度为 55.8° ,满足跟瞄系统稳定条件;跟踪误差小于 $46\ \mu\text{rad}$,超调量 18.7% ,调节时间 $t_s=0.039\ \text{s}$,满足精度和动态性能要求。因而速度滞后补偿传递函数 G_{ad} 为

$$G_{\text{ad}}(s)=\frac{0.35}{0.65s+1} \quad (17)$$

5 主光端机稳态跟踪精度测试

根据上述等效复合控制参数设计,在现有条件下对主光端机的跟踪瞄准精度进行Matlab软件仿真分析和实验测试。将跟踪误差作为衡量系统精度要求的指标,其值应满足小于 $100\ \mu\text{rad}$ 的条件。对主光端机输入等效运动姿态正弦输入信号 $\theta_1(t)=90\sin(0.003t)$ 和扰动等效正弦信号 $\theta_2(t)=\sin(t)$ 的耦合输入信号。光栅采样频率为 $1\ \text{kHz}$,CCD相机采

4.3 基于敏感度分析的速度、加速度滞后补偿参数设计

在设计好的速度补偿回路基础上加入加速度补偿,此时位置环开环传递函数为

$$G_{p2}(s)=\frac{K_1(T_2s+1)(T_3s+1)}{s[(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)-\alpha(T_3s+1)-\alpha\beta s]} \quad (13)$$

带有速度、加速度补偿的系统误差传递函数为

样频率为 $100\ \text{Hz}$,图像处理滞后时间为 $0.01\ \text{s}$ 。

将等效运动姿态正弦输入信号 $\theta_1(t)$ 和扰动等效正弦信号 $\theta_2(t)$ 耦合作为系统输入,仿真结果如图10所示。原系统跟踪误差小于 $1109\ \mu\text{rad}$,速度滞后补偿后系统跟踪误差小于 $320\ \mu\text{rad}$,速度、加速度滞后补偿后跟踪误差小于 $46\ \mu\text{rad}$;仿真验证经算法优化后的系统跟踪误差减小了 95.85% 。

随后对信号 $\theta_1(t)$ 和信号 $\theta_2(t)$ 分别进行仿真分析。等效运动姿态跟踪误差仿真图如图11所示,等效扰动跟踪误差仿真图如图12所示,表3是不同输入条件下不同控制方式的跟踪误差。

实验装置如图13所示,分为主光端机和从光端机两部分,从端在最大角速度为 $1^\circ/\text{s}$ 、最大角加速度为 $1^\circ/\text{s}^2$ 的扰动信号下,沿滑轨做模拟卫星运动,主光端机作为接收端,进行粗跟踪瞄准测试。其粗跟踪相机帧频为 $100\ \text{Hz}$,采样频率为 $10\ \text{ms}$ 。采用现场可编程门阵列(FPGA)和STM32作为控制器,通过FPGA采集光栅编码器数据和脱靶量,并将解算后的数据传输至STM32控制器,上位机软件实施监控和统一控制。

由于实际实验无法做到运动等效和扰动等效相耦合,因此分别进行测试。图14为最大角速度为 $1^\circ/\text{s}$ 、最大角加速度为 $1^\circ/\text{s}^2$ 的扰动信号下的实验结果。

经实验可知扰动实验测试下,没有补偿的系统跟踪误差最大为 $988.09\ \mu\text{rad}$,速度滞后补偿后系统跟踪误差优于 $369.65\ \mu\text{rad}$,速度、加速度滞后补偿后跟踪误差优于 $58.12\ \mu\text{rad}$;经等效复合控制,主光端机粗跟踪误差减小了 94.12% 。

运动姿态实验测试结果如图15所示,由于滑台长度有限,长度为 $1000\ \text{mm}$,能够模拟卫星运动行程周期的一小部分。系统跟踪误差最大为 $285.21\ \mu\text{rad}$,速度滞后补偿后系统跟踪误差优于 $57.42\ \mu\text{rad}$,速度、加速度滞后补偿跟踪误差优于 $56.86\ \mu\text{rad}$,速度补偿效果显著;虽然加速度补偿效果微小,但在实际运用场景时,卫星的运动和扰动相互耦合,因此对本项目依然有

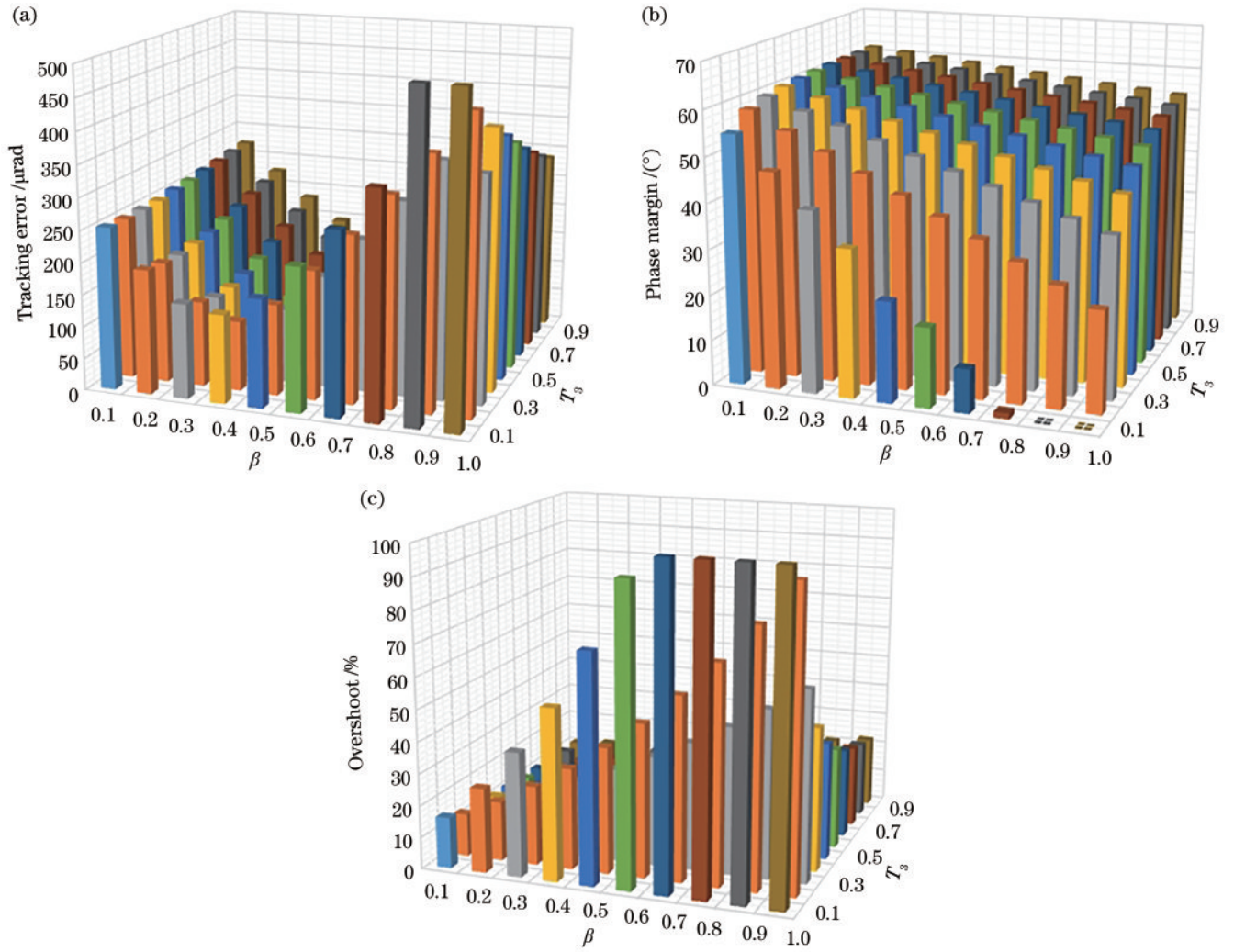


图 9 加速度滞后补偿参数影响图。(a)跟踪误差；(b)相位裕度；(c)超调量

Fig. 9 Influence diagram of acceleration lag compensation parameters. (a) Tracking error; (b) phase margin; (c) overshoot

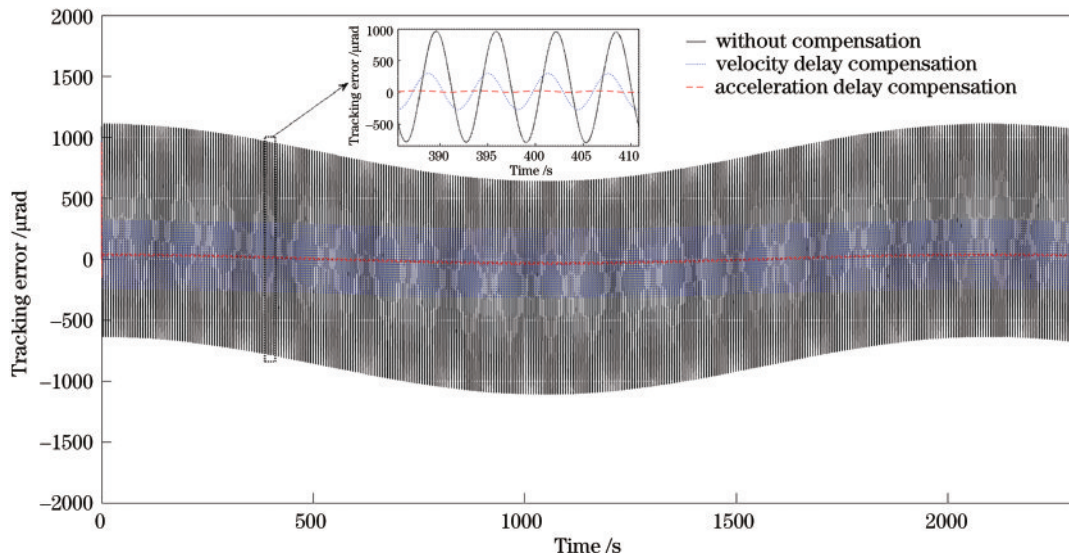


图 10 等效正弦稳态跟踪误差曲线

Fig. 10 Equivalent sine steady state tracking error curve

意义。实验结果如表 4 所示。

实验结果显示,设计的等效复合控制系统及其参

数的选定,满足主光端机粗跟踪最大跟踪误差

$\leq 100 \mu\text{rad}$ 的跟踪误差指标。

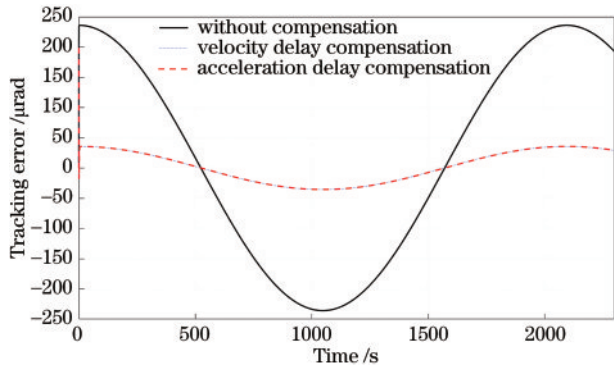


图 11 等效运动姿态跟踪误差曲线

Fig. 11 Equivalent motion attitude tracking error curve

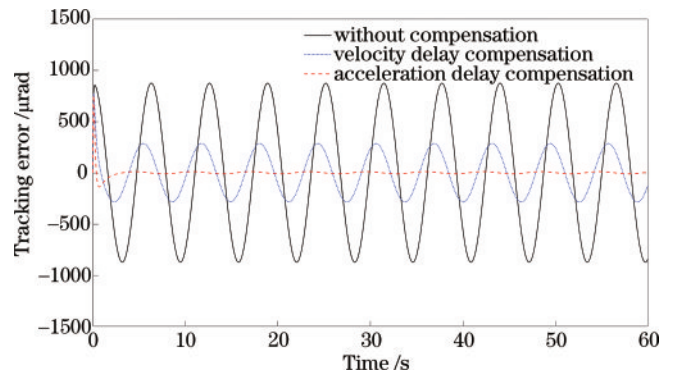


图 12 等效扰动跟踪误差曲线

Fig. 12 Equivalent disturbance tracking error curve

表 3 仿真实验跟踪误差结果

Table 3 Tracking error results of simulation experiment

Simulation target	Control method	Maximum tracking error / μrad	Accuracy of ascension
Motion disturbance coupling	Without compensation	1109	-
	Velocity delay compensation	320	3.47
	Acceleration delay compensation	46	24.11
Equivalent disturbance	Without compensation	873	-
	Velocity delay compensation	285	3.06
	Acceleration delay compensation	11	79.36
Equivalent movement	Without compensation	238	-
	Velocity delay compensation	47	5.06
	Acceleration delay compensation	46	5.17

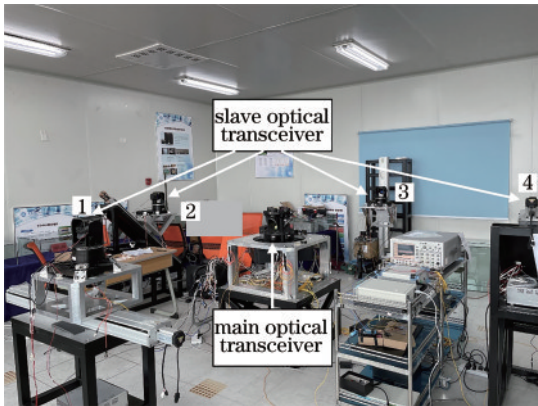


图 13 组网主光端机粗跟踪实验

Fig. 13 Coarse tracking experiment of main optical transceiver in networking

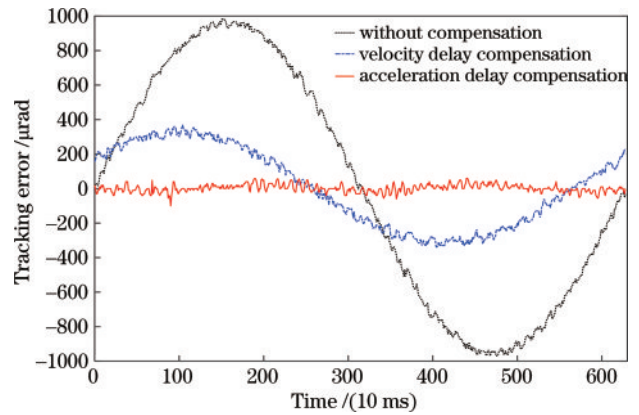


图 14 扰动实验测试跟踪误差曲线

Fig. 14 Tracking error curve of disturbance experimental test

表 4 实际实验跟踪误差结果

Table 4 Tracking error results of actual experiment

Simulation target	Control method	Maximum tracking error / μrad	Accuracy of ascension
Equivalent disturbance	Without compensation	988.09	—
	Velocity delay compensation	369.65	2.67
	Acceleration delay compensation	58.12	17.00
Equivalent movement	Without compensation	285.21	—
	Velocity delay compensation	57.42	4.97
	Acceleration delay compensation	56.86	5.02

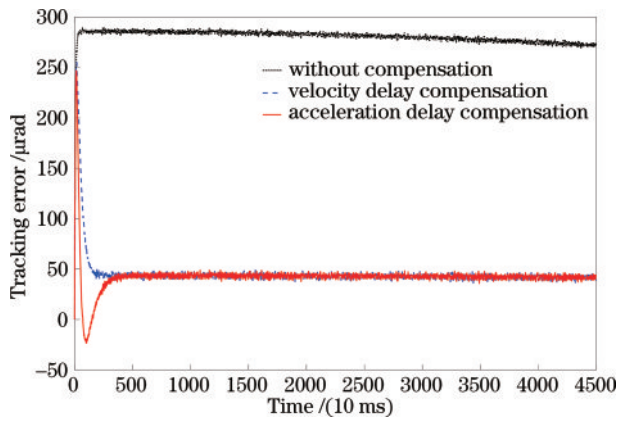


图 15 运动姿态实验测试跟踪误差曲线

Fig. 15 Tracking error curve of motion attitude experimental test

6 结 论

本文对空间激光通信的主光端机粗跟踪技术进行了研究,由于粗跟踪系统的相机采样保持环节和处理延迟环节导致滞后问题,使得PID控制下精度难以提升。因此引入等效复合控制的思想,获得良好效果。但该算法控制参数目前没有有效选择依据,针对这个问题,重点分析了不同参数对控制系统的敏感度,并给出参数选择原则;同时,考虑到轨道运动特性以及卫星扰动耦合特性,进行了进一步论证分析。仿真设计结果表明,采用等效复合控制后,系统跟踪误差约为 $46 \mu\text{rad}$,较未补偿前系统误差减小了 95.85% 。在此基础上搭建室内实验环境,经实验验证,存在扰动时,系统跟踪误差减小了 94.12% ;存在运动姿态变化时,系统跟踪误差减小了 80.06% 。验证了本文所提出的控制参数设计方法的正确性,即在误差传递函数推导的基础上,加以基于方差的敏感性分析,为后续控制参数的选择设计提供了理论指导和有效参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
Yu X N, Tong S F, Jiang H L, et al. Multi-point laser communication optical relay antenna servo system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0914001.
- [2] 姜会林,安岩,张雅琳,等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207-217.
Jiang H L, An Y, Zhang Y L, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015, 34(3): 207-217.
- [3] 王俊尧,宋延嵩,佟首峰,等. 空间激光通信组网反射镜联动跟踪控制技术[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 537-546.
Wang J Y, Song Y S, Tong S F, et al. Linkage tracking control technology of space laser communication network mirror[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 537-546.

- [4] 岑远遥. 基于捷联稳定的单反镜跟踪转台伺服系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021: 3-5.
Cen Y Y. Research on servo system of single reflect-mirror tracking and pointing turntable based on strapdown stability[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021: 3-5.
- [5] 白杨杨,岑远遥,孟立新,等. 空间激光通信组网从光端机控制技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406001.
Bai Y Y, Cen Y Y, Meng L X, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406001.
- [6] 贾远东,强佳,张亮,等. 基于自适应振动抑制的星载远距离测距跟踪方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2212003.
Jia Y D, Qiang J, Zhang L, et al. Spaceborne long-distance tracking method based on adaptive vibration suppression[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2212003.
- [7] Jono T, Toyoshima M, Takahashi N, et al. Laser tracking test under satellite microvibrational disturbances by OICETS ATP system[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4714: 97-104.
- [8] 宋申民,宋卓异,陈兴林,等. 卫星光通信粗瞄系统非线性摩擦的神经网络补偿[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 358-364.
Song S M, Song Z Y, Chen X L, et al. The nonlinear friction NN compensation of inter-satellite optical communication coarse pointing subsystem[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(2): 358-364.
- [9] 吴雨航. 基于加速度反馈的自适应控制算法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020: 7-14.
Wu Y H. Research on adaptive control algorithm based on acceleration feedback[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020: 7-14.
- [10] 任玉言. 卫星平台振动及轨道预报误差对星间链路捕获影响的分析及仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 7-14.
Ren Y Y. Analysis and simulation of the impact of satellite platform vibration and orbit forecast errors on intersatellite link acquisition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 7-14.
- [11] 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.
Yu X N, Tong S F, Zhao X, et al. Simulation system of the beacon pointing and acquisition process in the satellite laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0805007.
- [12] 王建立,吉桐伯,高昕,等. 加速度滞后补偿提高光电跟踪系统跟踪精度的方法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 681-685.
Wang J L, Ji T B, Gao X, et al. Study of improving the optoelectronic system capability to track moving targets by using acceleration delay compensation[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 681-685.

- [13] 谢婷婷, 杨忠, 郑志忠. 基于加速度滞后补偿的转台控制系统应用研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 81-86.
Xie T T, Yang Z, Zheng Z Z. Application research on turntable control system based on acceleration delay compensation[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(2): 81-86.
- [14] 孙健, 高慧斌, 王红宣, 等. 加速度滞后补偿环节参数的确定[C]//2003第三届光学精密工程学术研讨会. 北京: 中国仪器仪表学会, 2003: 202-205.
Sun J, Gao H B, Wang H X, et al. Determination of parameters of acceleration lag compensation[C]//2003 the Third Symposium on Optical Precision Engineering. Beijing: China Instrument and Control Society, 2003: 202-205.
- [15] 任启伟, 陈洋波, 周浩澜, 等. 基于 Sobol 法的 TOPMODEL 模型全局敏感性分析[J]. 人民长江, 2010, 41(19): 91-94, 107.
Ren Q W, Chen Y B, Zhou H L, et al. Global sensitivity analysis of TOPMODEL parameters based on Sobol method[J]. Yangtze River, 2010, 41(19): 91-94, 107.