

文章编号 1004-924X(2022)24-3178-11

星地量子跟踪仪的跟瞄控制系统

费 强¹, 邓永停^{2*}, 王雪峰¹, 邵 蒙², 谢虹波¹, 孙景旭¹

(1. 季华实验室, 广东 佛山 528000;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:星地量子通信传输距离长, 卫星与地面存在相对运动, 提高了对量子跟踪仪的跟踪性能要求。为了提高星地量子通信的跟踪精度, 降低量子通信的误码率, 本文对量子跟踪仪的跟瞄控制系统展开研究, 并对影响跟踪精度的总扰动进行补偿。首先, 介绍了星地量子通信链路、量子通信过程及其影响因素。接着, 搭建了量子跟踪仪的运动数学模型。基于跟踪仪的数学模型, 设计并提出自抗扰模型预测控制算法; 针对模式切换问题, 提出了分数阶跟踪微分器以优化轨迹减小超调。根据与“墨子号”卫星进行量子通信的实验结果: 分数阶跟踪微分器对模式切换后的目标捕获速度提高了 22%, 提出的自抗扰模型预测控制相比于传统的 PI 控制有更强的抗扰动能力, 削弱了俯仰换向的脱靶量尖峰, 跟踪精度达到 2.9", 提高了量子偏振数据接收量, 总误码率降低到 1.18%。本文提出的控制算法能够进一步提高量子跟踪仪的跟踪精度, 降低了误码率, 满足星地量子通信的精度要求。

关 键 词:量子跟踪仪; 量子通信; 自抗扰模型预测控制; 分数阶跟踪微分器; 跟瞄控制系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223024.3178

Tracking and aiming control system for satellite earth quantum tracker

FEI Qiang¹, DENG Yongting^{2*}, WANG Xuefeng¹, SHAO Meng², XIE Hongbo¹, SUN Jingxu¹

(1. Ji Hua Laboratory, Foshan 528000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,
Changchun 130033, china)

* Corresponding author, E-mail: dyt0612@163.com

Abstract: The long transmission distance of satellite ground quantum communication and the relative motion between the satellite and ground increase the tracking performance requirements of a quantum tracker. To improve the tracking accuracy of satellite ground quantum communication and reduce the error rate of quantum communication, the tracking and pointing control system of a quantum tracker is investigated in this study, and the total disturbance affecting the tracking accuracy is compensated. First, the satellite ground quantum communication link and the quantum communication process and its influencing factors are introduced. A mathematical model of the quantum tracker is then constructed. Based on the mathematical model of the tracker, an active disturbance rejection control (ADRC) model predictive control algo-

收稿日期: 2022-10-18; 修订日期: 2022-11-08.

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (No. 2018B030328001); 国家自然科学基金资助项目 (No. 11973041, No. 12122304); 中科院青促会会员项目资助 (No. 2019218)

rithm is designed and proposed. To solve the problem of mode switching, a fractional order tracking differentiator is proposed to optimize the trajectory and thus reduce overshoot. Experimental results of quantum communication with the “Mozi” satellite reveal that the fractional order tracking differentiator improves the target acquisition speed by 22% following mode switching. Compared with the traditional PI control, the proposed ADRC model predictive control has stronger anti-interference capabilities, weakens the miss distance peak of pitch reversal, and has a tracking accuracy that reaches 2.9". The quantum polarization data reception is improved, and the total bit error rate is reduced to 1.18%. The proposed control algorithm can further improve the tracking accuracy of the quantum tracker, reduce the bit error rate, and meet the accuracy requirements of satellite ground quantum communication.

Key words: quantum tracker; quantum communication; ADRC Model Predictive Control; fractional order tracking differentiator; tracking and aiming control system

1 引 言

随着通信技术的发展,通信安全在军事等特殊领域被尤为重视。量子通信具有理论上无条件安全性的特点,世界各国均投入了大量的资源进行研究,以美国为代表的西方发达国家正在研究量子通信技术,鉴于其安全性,该技术在国防、金融及一些政要部门有较大的运用价值。

量子通信基于量子力学的两个基本原理:量子的不可分割性和量子态的测量塌缩性^[1]。量子通信传输的是密钥,而不是被加密的信息本身。一旦量子信道建立,将在发送方和接收方产生随机数密钥,利用量子态作为信息载体,经量子信道传送。第三方无法实现对量子态进行测量而不干扰量子态本身,一旦被测量就会被用户发现。由于量子的不可克隆定理使得任何物理上可实现的量子复制机都无法复制出与输入量子态完全一样的量子态。因此,相比于经典通信,量子通信可以实现严格数学证明下的安全性。

随着世界首颗搭载量子通信设备的科学实验卫星“墨子”号发射升空,为量子通信开辟了星地量子通信链路,对星地量子通信的相关研究不断产出新的成果。潘建伟团队利用“墨子号”卫星在国际上率先完成了一系列具有开创意义的星地量子科学实验:星地量子密钥分发、洲际量子密钥分发以及基于纠缠的无需可信中继量子密钥分发等^[2]。

量子通信的成码率是衡量通信效率的重要指标,而跟瞄技术是决定星地量子通信成码率高低的關鍵技术之一,其跟瞄性能直接影响量子通

信时间及成码率。因此本文对量子跟踪仪的跟瞄控制展开研究,以提高对量子通信的对准跟踪精度。

量子跟踪仪的结构设计类似于光电经纬仪,即由方位轴系和俯仰轴系组成的二维转台。量子通信与激光通信从高精度跟踪的角度,是具有相似性的,即捕获、瞄准和跟踪。因此精密控制技术是实现高精度性能的保证^[3],也是量子通信跟踪系统最为核心的技术。从本质上看,量子通信跟踪系统依然是基于电机的转台转动机制,对于转台的控制算法依然是保证高精密跟踪的关键。

文献提出了一种反步自适应积分滑模摩擦补偿控制策略,针对光电转台爬行抖振的问题,提高了角速度跟踪精度^[4]。文献[5]通过模糊增益调整方法对转台控制参数进行调整,提高了转台的精度和响应速度。文献[6]通过设计分段变参数控制算法提高了光电跟瞄系统的系统带宽和跟踪精度。文献[7]设计了基于弧形永磁同步电机的跟踪控制系统,通过位置指令整形算法实现了大位置调转和小位置阶跃的快速无震荡控制。文献[8]通过设计结构滤波器和加速度反馈方法提高了光电望远镜控制系统的闭环带宽。自抗扰控制作为对扰动补偿效果较好的方法之一,近几年在控制领域有了更广泛的应用,并较为系统的阐述了自抗扰控制的研究进展^[9]。为了抑制惯导测试转台的摩擦力矩,文献[10]提出了一种摩擦前馈与自抗扰技术相结合的复合控制算法,可以提高抗干扰性能和鲁棒性。文献[11]设计了一种自适应线性自抗扰的算法,并通过频域分析对参数进行整定,对自抗扰算法的工程应

用提供了方法。自抗扰控制也被用于永磁同步电机电流环控制器,通过改进的模型实现了对电流和力矩的精确控制^[12]。

本文基于量子通信的应用,为了满足量子通信对跟踪性能的要求,介绍了量子通信基本链路和系统组成。设计了量子跟踪仪的跟踪控制系统,对影响跟踪性能及量子成码率的关键点进行算法设计。

2 星地量子通信系统

2.1 星地量子通信链路

图1为星地量子通信链路图。它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、传送、探测、解调等功能^[13]。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,因此采用信标光接收/发射系统辅助捕获瞄准过程。星上指向系统会根据星上任务规划处理系

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,开始进行通信。

2.2 星地量子通信链路影响因素

采用星地量子通信可以大幅度扩展通信距离,搭建量子通信网络,实现多地通信。同时,星地链路也存在多种影响量子成码率的因素。星地量子通信系统中信道受大气影响,即光在大气中的散射与吸收、大气湍流等,使得量子光传输变得复杂^[14]。星地链路距离较远,信号功率衰减较大,背景光对信号成码率的影响不能忽略,背景环境噪声、光机系统噪声等可以通过设计遮光罩等方法进行削弱。

对于星地远距离传输,持续稳定的通信是成码量的保障。量子通信的光源的发散角在微弧度级别,并且为了获得更高的成码率,要求减小光源的发散角,从而减小链路信道的衰减,但是,发散角越小,对量子收发过程中的跟踪精度要求就越高。因此,高精度跟踪控制技术是量子成码率高低的核心技术。

3 量子跟踪仪跟踪控制系统设计

3.1 量子跟踪仪运动系统模型

量子跟踪仪跟踪架设计为地平式结构,其方位轴和俯仰轴均采用力矩电机直驱的驱动方式,以增强结构刚度,提高控制系统的谐振频率。

基于力矩电机的量子跟踪仪的电气模型:

$$u_d = E + R_d i + L_d \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

式中: u_d 为力矩电机的定姿电压, E 为反电动势, R_d 为电机的电枢电阻, L_d 为电机电感, i 为定子电流。

量子跟踪仪的运动学方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t i - B\omega + T_L, \quad (2)$$

式中: J 为量子跟踪仪折算到电机轴系的总转动惯量, K_t 为力矩的电机的力矩系数, B 为机械阻尼系数, ω 为电机转速, T_L 为总扰动转矩,包括负载转矩、摩擦力矩等。

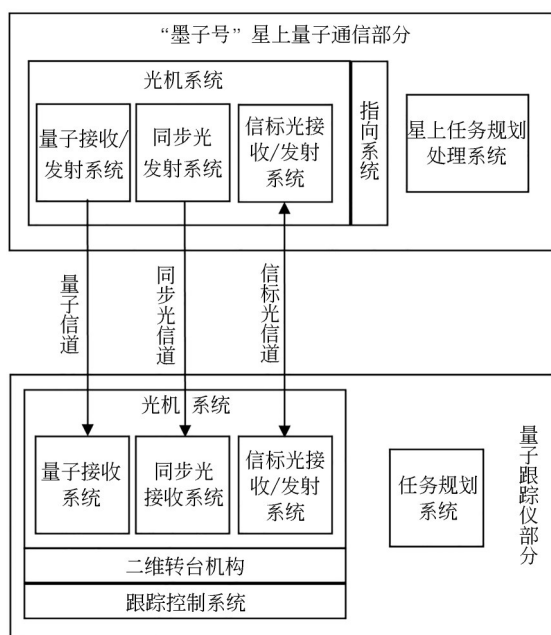


图1 星地量子通信链路图

Fig.1 Satellite ground quantum communication link diagram

3.2 量子跟踪仪跟踪控制组成

量子跟踪仪跟踪控制系统整体框图如图 2 所示。图 2 中电流环模型, K_v 和 T_v 分别表示逆变放

大电路的增益系数和时间常数, $\Delta\theta$ 表示信标光探测器提取的脱靶量信息, θ_{ref} 表示“墨子号”卫星预定轨道信息。

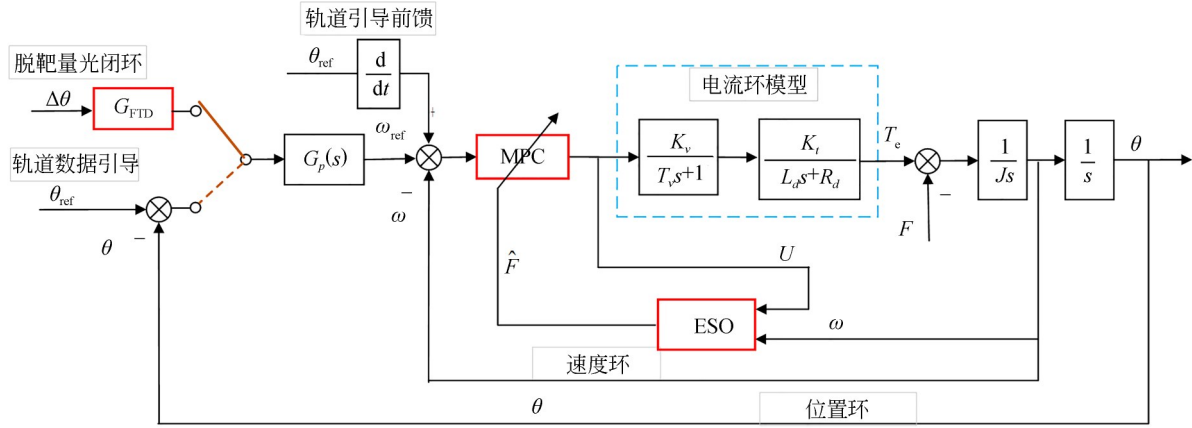


图 2 量子跟踪仪控制系统整体框图

Fig. 2 Overall block diagram of quantum tracker control system

本文采用串联闭环控制策略,外环为位置环,内环为速度环。位置环是保证量子跟踪仪精确指向和高精度跟踪的环节,在轨道数据引导模式下,能够准确的跟踪轨道位置数据;在脱靶量闭环模式下,使脱靶量趋近于零。 $G_p(s)$ 为位置环控制器,采用经典的 PI 控制策略:

$$G_p(s) = \frac{k_{pp}(\tau_{pi}s + 1)}{\tau_{pi}s}, \quad (3)$$

式中: k_{pp} 为位置环 PI 控制器的比例系数, τ_{pi} 为积分系数,经典 PI 控制器目前已有大量研究文献,故不再展开描述。

速度环是控制系统中抗干扰和动态性能的关键环节,能够保证控制系统在受到干扰后快速矫正到原稳定状态,因此本文对速度环进行控制器设计以提高控制系统的抗干扰能力。

量子跟踪仪建立量子信道过程中,轨道数据引导模式与脱靶量光闭环模式自动切换,在切换至脱靶量光闭环模式时,通过设计分数阶跟踪微分器 G_{FTD} 对脱靶量数据进行处理,提高任意位置脱靶量切换的成功概率。

3.3 基于自抗扰的模型预测控制器设计

3.3.1 速度环预测控制器设计

模型预测控制的设计目标是通过预测模型

计算在当前时刻下,未来时刻多步的控制量,以优化模型输出量的未来的控制效果。在有限预测步长内,对模型进行多步预测,通过优化函数计算出一组最优控制量作为系统的实际控制量。根据模型预测控制的设计原则^[15],利用欧拉离散法对式(2)进行离散化。离散后的运动学方程为:

$$\begin{aligned} \omega(k+1) &= \left(1 - \frac{BT_s}{J}\right)\omega(k) + \frac{K_t T_s}{J}i(k) + \\ &\quad \frac{T_s}{J}T_L(k), \end{aligned} \quad (4)$$

式中, T_s 为采样周期,为了简化多步预测的推导,令 $x(k) = \omega(k)$, $u(k) = i(k)$, $f(k) = T_L(k)$, $A = \left(1 - \frac{BT_s}{J}\right)$, $B = \frac{K_t T_s}{J}$, $C = \frac{T_s}{J}$ 。

式(4)可以写为:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Cf(k). \quad (5)$$

在当前时刻 k 下,对模型(5)进行多步预测推导:

$$\begin{aligned} x(k+2|k) &= \\ &= Ax(k+1|k) + Bu(k+1|k) + Cf(k+1|k) = \\ &= A^2x(k) + ABu(k) + Bu(k+1) + \\ &\quad ACf(k) + Cf(k+1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x(k+N_p|k) = & Ax(k+N_p-1|k) + Bu(k+N_p-1|k) + \\
& Cf(k+N_p-1|k) = A^{N_p}x(k) + A^{N_p}Bu(k) + \dots + \\
& (A^{N_p-N_c}B + \dots + B)u(k+N_c-1) + \\
& A^{N_p-1}Cf(k) + \dots + Cf(k+N_p),
\end{aligned} \quad (6)$$

其中: N_p 和 N_c 分别为预测步长和控制步长, 且控制补偿的选取通常小于等于预测步长。 $x(k+N_p|k)$ 表示在第 k 时刻下, 第 N_p 步的预测。定义向量: $\mathbf{X}(k) = [x(k+1|k), x(k+2|k), \dots, x(k+N_p|k)]^T$; $\mathbf{U}(k) = [u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+N_p-1|k)]^T$; $\mathbf{F}(k) = [f(k|k), f(k+1|k), \dots, f(k+N_p-1|k)]^T$, 将离散的多步预测模型写成向量形式:

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}\mathbf{x}(k) + \mathbf{Q}\mathbf{U} + \boldsymbol{\epsilon}\mathbf{F}, \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{N_p} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} A^{N_p-1}C \\ A^{N_p-2}C \\ \vdots \\ AC \\ C \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} B & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 \\ A^{N_c-1}B & \dots & B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A^{N_p-1}B & \dots & \sum_{i=0}^{N_p-N_c} A^i B \end{bmatrix}.$$

模型预测速度控制器的目标是确保量子跟踪仪的转动速度能够准确的跟踪参考速度, 假设参考速度在预测步长范围内保持恒定, 对于速度环预测控制器, 通过最小化价值函数 J_{cost} 得到最优控制量 $\mathbf{U}$, 即

$$J_{\text{cost}} = \|\mathbf{W} - \mathbf{X}\|_M^2 + \|\mathbf{U}\|_N^2, \quad (8)$$

式中: $\mathbf{W} = [\omega_r(k+1) \ \omega_r(k+2) \ \dots \ \omega_r(k+N_p)]^T$ 是输出期望值的向量表示, 即量子跟踪仪的期望速度值, N 为控制权值, 用于限制控制量的剧烈变换, 防止速度出现过大大超调。将式(7)带入式(8)中, 并求取最小化价值函数, 即 J_{cost} 的一阶导数:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J_{\text{cost}}}{\partial \mathbf{U}} = & -2\mathbf{Q}^T(\mathbf{W} - \mathbf{P}\mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\epsilon}\mathbf{F}) + \\
& 2(\mathbf{Q}^T\mathbf{Q} + \mathbf{N})\mathbf{U},
\end{aligned} \quad (9)$$

令 $\partial J_{\text{cost}}/\partial \mathbf{U} = 0$, 可以得到在第 J_{cost} 时刻的最优控制量 $\mathbf{U}$, 即:

$$\mathbf{U} = (\mathbf{Q}^T\mathbf{M}\mathbf{Q} + \mathbf{N})^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{M}[\mathbf{W} - \mathbf{P}\mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\epsilon}\mathbf{F}], \quad (10)$$

从式(10)中可以看出, 只有总扰动 $\mathbf{F}$ 是未知的, 因此将设计自抗扰算法估计出总扰动值 $\hat{\mathbf{F}}$, 并补偿于速度环预测控制器中。

3.3.2 扩张状态观测器设计

量子跟踪仪进行通信过程中, 随着“墨子号”卫星轨道的移动, 当仰角到达最高点时, 卫星与地面距离最近, 此时的通信距离最短, 量子接收量可以达到最大。但是, 量子跟踪仪在仰角最高时刻, 俯仰轴会出现零速的变向, 由于摩擦力的存在, 直接导致在接收条件最佳的时刻无法达到通信所要求的跟踪精度。同时, 由于量子跟踪仪多用于野外环境, 风扰等外部扰动也会影响通信过程的跟踪精度。这些扰动可以看作是上一小节搭建的预测模型中的总扰动 $\mathbf{F}$ 。因此需要设计控制器补偿总扰动量, 提高量子跟踪仪的跟踪精度。

自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 是相比经典 PID 控制具有更好的抗扰动性能和控制性能, 而自抗扰的核心是观测器。为了提高量子跟踪仪速度环的抗扰动能力, 设计自抗扰速度控制器, 通过扩张状态观测器, 可以估计出系统的总扰动 $\hat{\mathbf{F}}$ 。从而补偿到模型预测控制器中。

根据运动方程(2), 改写为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_t}{J}i - \frac{B\omega + T_L}{J}, \quad (11)$$

设 $F = -(B\omega + T_L)/J$, $a_0 = K_t/J$, $y = x_1 = \omega$, $x_2 = F$, $dx_2/dt = \hat{F}$ 。

系统的状态方程为:

$$\begin{cases} y = x_1 \\ \dot{x}_1 = a_0 i + x_2, \\ \dot{x}_2 = \hat{F} \end{cases} \quad (12)$$

根据线性扩张状态观测器原理, 得观测模型:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 + a_0 i - \beta_1 e, \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (13)$$

式中: $z_2 = \hat{F}$ 为观测器的输出,即总扰动的估计值, β_1 和 β_2 为观测器参数。

3.3.3 轨道数据引导与光闭环稳定切换

量子跟踪仪的捕获过程是:预先约定量子通信的时间,地面卫星站点上注信息至“墨子号”的星上任务规划处理系统,并在预定的时间通过指向系统使量子通信相关的信道始终指向地面量子跟踪仪。同时,量子跟踪仪通过地面任务规划系统接收到“墨子号”的轨道信息并进入轨道数据引导模式,量子跟踪仪的光学系统始终指向轨道方向。当星上信标光出现在量子跟踪仪的视场中时,由轨道数据引导模式切换至信标光闭环模式,待达到要求的跟踪精度后,即可进行量子通信。

由于信标光光斑在初始时刻可能出现在视场的任意位置,因此初始脱靶量的值不固定,可大可小,导致在轨道数据引导模式切换至信标光闭环模式的过程中,有概率切换失败,从而失去目标。两种模式的切换过程可以看作时位置的阶跃跟踪。脱靶量较大时,意味着系统有较大的阶跃输入,易引起系统的超调,考虑到脱靶量提取过程中,会引入测量噪声,因此设计跟踪微分器过渡切换过程,并且对脱靶量数据进行滤波处理。

常用的跟踪微分器有一阶线性跟踪微分器,非线性微分跟踪器^[16],Levant微分器^[17]。本文根据分数阶理论^[18],设计了带有分数阶微分算子的跟踪微分器,即分数阶跟踪微分器,其形式如下:

$$G_{\text{FTD}} = \frac{1}{(1/T)s^u + 1}, \quad (14)$$

式中: T 为微分器的时间常数, s^u 为分数阶微分算子,其中 u 是分数形式。

对比 4 种跟踪微分器对于阶跃信号的跟踪效果,如图 3 所示。从图中可以看出,4 种跟踪微分器对于阶跃信号的跟踪均无超调,从响应时间上看,分数阶跟踪微分器略优于一阶线性跟踪微分器,且比其他两种微分器更快。

保持 4 种跟踪微分器的参数不变,对比 4 种

跟踪微分器对噪声的滤波效果,如图 4 所示。

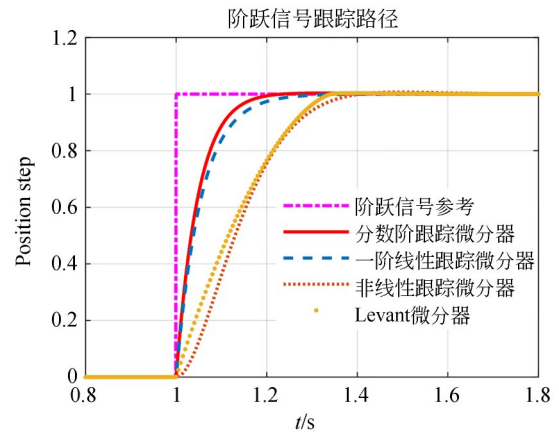


图 3 4 种微分器阶跃响应比较

Fig. 3 Comparison of step response of four differentiators

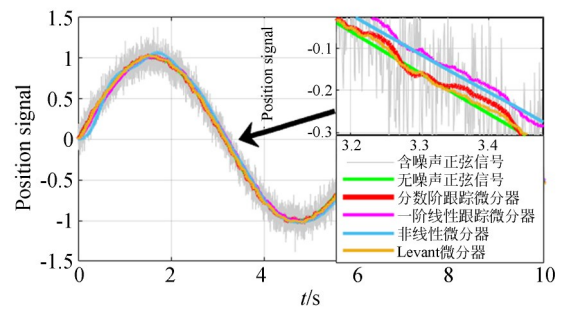


图 4 4 种微分器拟合曲线效果

Fig. 4 Curve fitting effect of four differentiators

跟踪幅值为 1, 频率为 0.16 Hz 的正弦信号,其中含有方差为 0.01 随机噪声。如图 4 所示(彩图见期刊电子版),灰色曲线为含有噪声的正弦信号,绿色曲线为无噪声的正弦信号,从图中可以看出,非线性微分器拟合原信号的效果较差,且与一阶线性跟踪微分器都具有明显的滞后。而分数阶跟踪微分器和 Levant 微分器的滤波效果最佳,且滤波后的能够较好的拟合无噪声的正弦信号。

因此,所设计的分数阶跟踪微分器不仅对阶跃信号有较好的过渡效果,同时对噪声有较好的滤波效果。对于轨道数据引导模式切换至信标光闭环模式时,脱靶量可由分数阶跟踪微分器进行处理后再进行控制系统跟踪。

4 实验结果及分析

4.1 模式切换实验

量子跟踪仪采用力矩电机,其连续堵转力矩为 7.7 Nm,电枢电阻 8.27 Ω ,电枢电感 16.21 mH,转矩波动系数实测值为 1.64%。位置反馈器件选用 32 位绝对式光栅编码器。探测器帧频为 50 Hz,作为脱靶量光闭环反馈器件。

现对已研制的量子跟踪仪进行实验验证,量子跟踪仪光学口径为 280 mm,“墨子号”卫星经过观测站点天区的时间约凌晨 12 点左右,量子通信现场如图 5 所示,空中绿点为“墨子号”卫星与量子跟踪仪对接成功后发出的同步光。

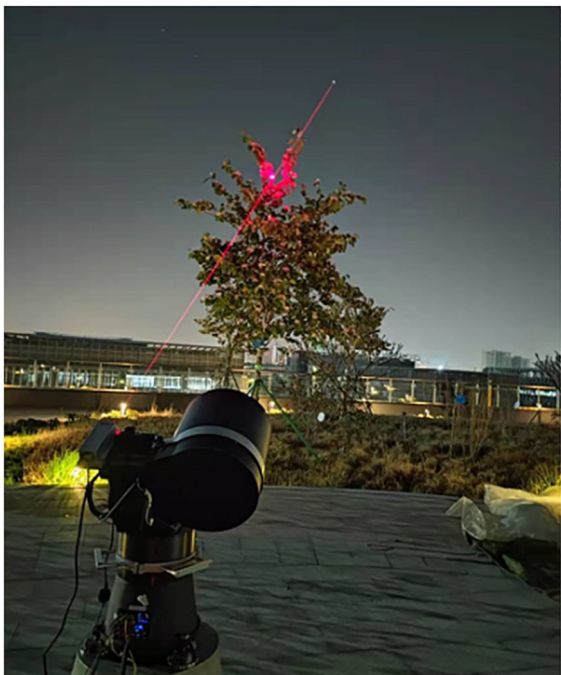


图 5 量子通信实验现场

Fig. 5 Quantum communication experiment site

量子跟踪仪的轨道数据引导模式与脱靶量光闭环模式切换过程进行对比实验,分别采用文章提出的分数阶跟踪微分器算法和工程中常用的一阶线性跟踪微分器进行比较,其中,分数阶跟踪微分器的微分算子 s^u 中的 u 取值为 1.02,时间常数 T 均取值为 0.045。由于无微分跟踪器情况下,切换过程易切飞且成功率较低,因此不对此情况下的数据进行比较。

量子通信实验过程中,目标会随机出现在视

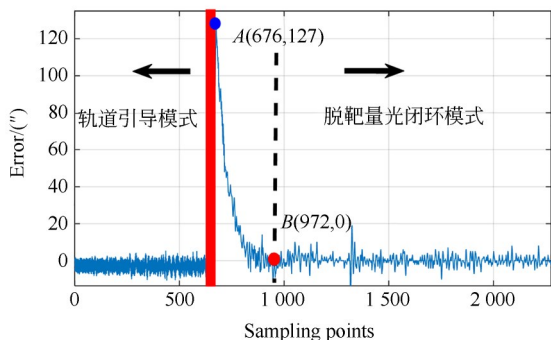


图 6 基于分数阶跟踪微分器的模式切换过程

Fig. 6 Mode switching process based on fractional order tracking differentiator

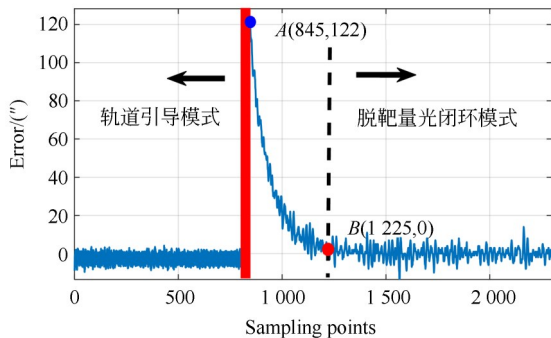


图 7 基于一阶线性跟踪微分器的模式切换过程

Fig. 7 Mode switching process based on first order linear tracking differentiator

场的任意位置,因此,选取不同跟踪微分器算法下的相近的脱靶量起始位置作为对比。图 6 为采用分数阶微分跟踪器的实验数据曲线,当由轨道引导模式切换至脱靶量光闭环模式时,目标出现在视场中的脱靶量为 127",经过 296 个采样周期后,脱靶量光闭环模式将目标捕捉到视场中心。图 7 为一阶跟踪微分器的实验曲线,目标出现在视场中的脱靶量为 122",经过 380 个采样周期后,被捕捉到视场中心。对比以上实验结果,本文提出的分数阶跟踪微分器可以有效的提高脱靶量光闭环模式下的捕获目标的速度,与一阶线性跟踪微分器相比,捕获速度提高了 22%。捕获过程中无超调,进一步提高了模式切换效率和捕获成功率。

4.2 轨道数据引导测试

先对“墨子号”轨道进行数据引导测试,以了解整轨的位置运动轨迹、速度曲线及量子跟踪仪

伺服控制系统自身的跟踪情况。因量子跟踪仪的方位轴和俯仰轴控制系统基本一致,且俯仰轴存在速度换向的问题,故仅提供俯仰轴实测结果。测试结果如图 8~图 11 所示(彩图见期刊电子版)。

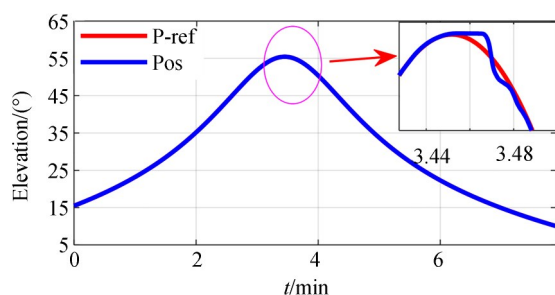


图 8 轨道仰角参考位置曲线于实际位置跟踪曲线

Fig. 8 Orbital elevation reference position curve and actual position tracking curve

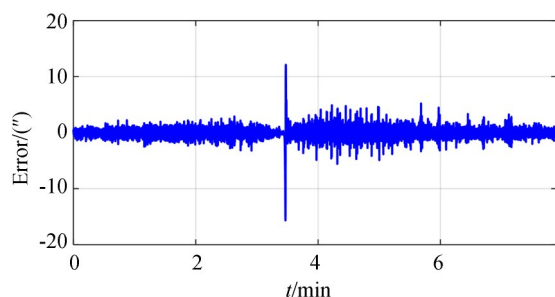


图 9 轨道位置跟踪误差

Fig. 9 Track position data tracking error

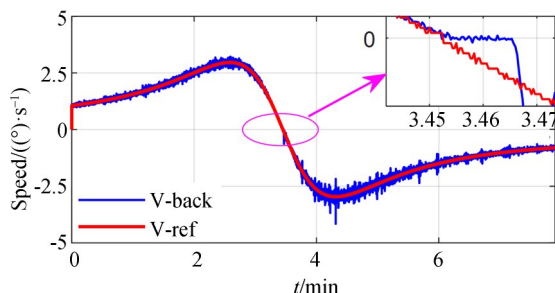


图 10 轨道仰角参考速度曲线及实际输出速度曲线

Fig. 10 Reference speed curve of orbit elevation and actual output speed curve

如图 8 所示,红色曲线为轨道仰角参考位置曲线,蓝色为量子跟踪仪的俯仰轴跟踪曲线。仰角到达最高点 56° 时,开始减小,即速度出现换向,此时由于外部扰动的作用,影响了对参考轨

迹的跟踪。图 9 为轨道数据引导模式下,量子跟踪仪自身的位置跟踪误差,RMS 为 $3''$ 。

如图 10 所示,红色曲线为轨道运动的参考速度,蓝色为跟踪仪的跟踪速度。在放大的图中可以看出,速度换向时刻,出现短暂的跟踪速度为零的时间。此时仰角到达最高点,量子接收效率最高,但由于换向问题可能导致接收中断。图 11 为量子跟踪仪的速度跟踪误差。

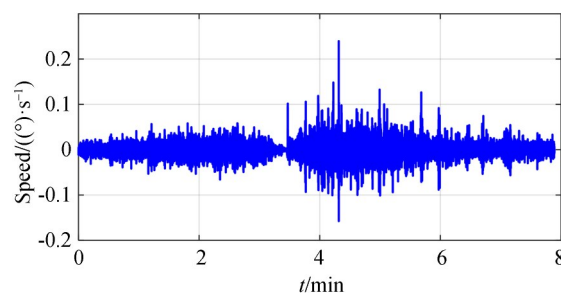


图 11 跟踪速度误差

Fig. 11 Tracking speed error

4.3 脱靶量光闭环对比实验

由于实际墨子号轨迹与轨道数据有偏差,因此需要切换脱靶量光闭环模式,以提高对卫星的跟踪精度。现对本文提出的基于自抗扰的模型预测速度控制器进行实验验证,所提出的算法主要针对外部扰动对控制系统造成的影响。量子跟踪仪执行量子通信任务时,由于卫星轨道特性,量子跟踪仪的跟踪俯仰角会经过有小变大到大变小的过程,因此存在俯仰轴最高角换向的问题,在换向过程中,摩擦力等外部扰动会导致跟踪误差变差。而俯仰角最高的时刻是卫星距离站点最近的时刻,此时也是量子接收量最大的时刻,因此解决量子跟踪仪换向误差变大的问题,是降低误码率和提高成码量的关键。

分别对本文提出的算法和传统的 PI 算法进行实验比较,对比换向时刻的跟踪误差和量子接收量情况。观测器参数 β_1 和 β_2 分别取值为 -450 和 $-22\ 500$ 。预测控制器参数:预测步长 $N_p = 6$,控制步长 $N_c = 1$,权重矩阵 $M = 1.1 \times I_{6 \times 6}$, $N = 1$ 。速度环采样频率为 1 kHz ,脱靶量反馈数据频率为 50 Hz ,量子接收计数频率为 1 Hz 。

为准确验证提出算法的效果,位置环均采用 PI 控制器,参数保持一致,即, $k_{pp} = 17.8$, $\tau_{pi} =$

4.32。且均采用前馈控制,轨道数据引导模式采用位置差分方法进行速度环前馈;脱靶量光闭环模式由总控系统解算原轨道速度数据对速度环进行前馈矫正。

由于无法获取完全相同的轨道,因此选取两组“墨子号”卫星轨道轨迹相近的实验进行对比,轨道最大仰角为 56° 和 58° 。

图12和图13分别为量子跟踪仪应用传统控制算法的脱靶量跟踪误差和对应的量子偏振4路(H,V,+,−)接收计数总和。根据图12数据统计,量子跟踪仪跟踪脱靶量RMS值为 $4.5''$ 。从图13中可以看出,量子跟踪仪从采样时间100~500内开始接收量子数据,也表示从采样时间100开始,完成了量子信道的建立并开始传输量子信息。在采样时间300左右的时刻达到接收量的最大值,即40k,此时也是轨道仰角较高的区间,但是此区间内,量子跟踪仪会经历换向的过程,由于外部扰动等影响使得跟踪轨迹出现“平顶”的现象,即图12中的脱靶量的尖峰,约 $136''$,因此会短暂导致丢失目标,从而出现图13中量子接收

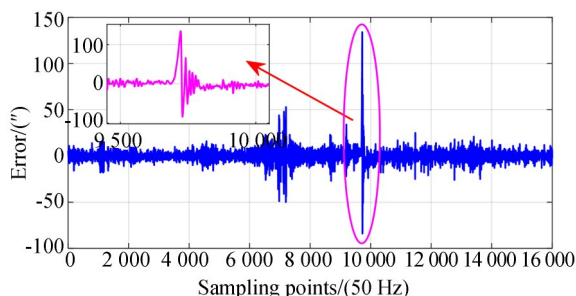


图12 基于传统控制算法的脱靶量跟踪误差

Fig. 12 Miss distance tracking error based on traditional control algorithm tracking differentiator

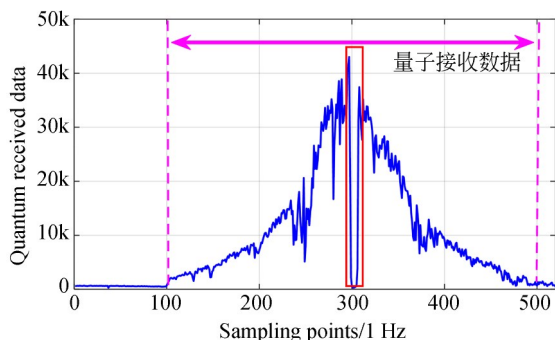


图13 量子接收数据总和

Fig. 13 Sum of quantum received data

量的突变。接收数据经实验中心处理后的总误码率为2.07%。

图14和图15分别为自抗扰模型预测控制算法下的脱靶量跟踪误差和对应的量子偏振四路接收计数总和。根据图14的数据统计,使用本文提出的控制算法的跟踪脱靶量RMS值为 $2.9''$,俯仰换向尖峰为 $34''$ 。图15可以看出,从采样时间122开始接收量子数据,并且由于换向尖峰的削弱,依然能够接收到量子数据,约17k。经过对数据的处理,此轨实验的总误码率为1.18%。

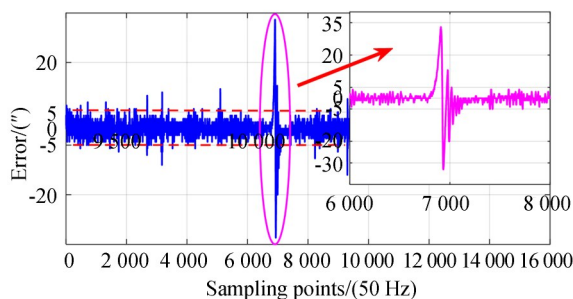


图14 基于自抗扰模型预测控制的脱靶量误差

Fig. 14 Miss distance error based on auto disturbance rejection model predictive control

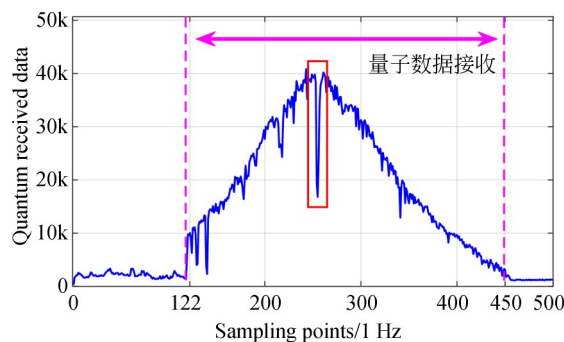


图15 量子接收数据总和

Fig. 15 Sum of quantum received data

5 结论

本文根据星地量子通信的实验需求,对量子跟踪仪的控制系统进行设计。针对量子跟踪仪的模式切换问题,提出了分数阶跟踪微分器,与传统的一阶线性跟踪微分器相比,捕获速度提高了22%。捕获过程中无超调,进一步提高了模式切换效率和捕获成功率。为了提高量子数据接收量,本文提出了自抗扰模型预测控制算法,经

过与“墨子号”卫星进行量子通信的实验验证,本文提出的算法相较传统的控制算法,跟踪误差从4.5"降低为2.9",并且在换向时刻有效的削弱了脱靶量尖峰,即尖峰值从136"降低到34",量子数据接收未中断,经过实验中心对量子接收数据的

处理,反馈的总误码率由2.07%降低到1.18%。综上,本文的研究进一步提高了量子跟踪仪的跟踪精度以及特殊工况下的抗扰能力,为远距离星地量子通信及全域站点布局提供了配套载体平台条件。

参考文献:

- [1] 谢臻. 量子通信现状与展望[J]. 数字通信世界, 2018(12): 161.
XIE ZH. Present situation and prospect of quantum communication [J]. *Digital Communication World*, 2018(12): 161. (in Chinese)
- [2] LU C Y, CAO Y, PENG C Z, *et al.* Micius quantum experiments in space [J]. *Review of Modern Physics*, 2022, 94 : 035001
- [3] 唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 3-31.
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): 3-31. (in Chinese)
- [4] 周新力, 李醒飞. 基于反步积分滑模摩擦补偿的光电伺服转台控制[J]. 信息与控制, 2022, 51(2): 247-256.
ZHOU X L, LI X F. Electro-optical servo turntable control based on backstepping integral sliding mode friction compensation[J]. *Information and Control*, 2022, 51(2): 247-256. (in Chinese)
- [5] 邓晗, 张鹏, 肖宏. 基于综合转台的复合控制方法研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(6): 132-136.
DENG H, ZHANG P, XIAO H. Research on compound control method based on integrated turntable [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2022(6): 132-136. (in Chinese)
- [6] 贾琦, 隋印. 一种光电跟瞄转台控制系统的设计与实现[J]. 光电技术应用, 2020, 35(4): 5-8, 40.
JIA Q, SUI Y. Design and implementation of electro-optical tracking and pointing turntable control system[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(4): 5-8, 40. (in Chinese)
- [7] 邓永停, 刘军, 李洪文, 等. 基于分段弧形永磁同步电机的4m望远镜控制系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 591-600.
DENG Y T, LIU J, LI H W, *et al.* Control system of 4 meters telescope based on segmented permanent magnet arc synchronous motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(3): 591-600. (in Chinese)
- [8] 邓永停, 李洪文, 王建立. 提高大口径望远镜控制系统闭环带宽的方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 348-356.
DENG Y T, LI H W, WANG J L. Methods of improving closed-loop bandwidth for large telescope control systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 348-356. (in Chinese)
- [9] 陈增强, 刘俊杰, 孙明玮. 一种新型控制方法: 自抗扰控制技术及其工程应用综述[J]. 智能系统学报, 2018, 13(6): 865-877.
CHEN Z Q, LIU J J, SUN M W. Overview of a novel control method: active disturbance rejection control technology and its practical applications [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2018, 13(6): 865-877. (in Chinese)
- [10] 朱海荣, 吴瑜, 张先进, 等. 基于摩擦补偿和自抗扰的惯导测试转台复合控制[J]. 航空兵器, 2020, 27(4): 97-102.
ZHU H R, WU Y, ZHANG X J, *et al.* Compound control of an inertial navigation test turntable based on friction compensation and active disturbance rejection control [J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(4): 97-102. (in Chinese)
- [11] LIU C Q, LUO G Z, DUAN X L, *et al.* Adaptive LADRC-based disturbance rejection method for electromechanical servo system [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(1): 876-889.
- [12] GAO Y N, ZHAO H, MA K M, *et al.* Control design for current loop of PMSM using A modified model-compensation ADRC controller [C]. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). July 27-29, 2020. Shenyang, China. IEEE, 2020: 2545-2550.
- [13] 梁创, 符东浩, 梁冰, 等. 量子密码通信的信号发

- 送与处理系统[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(3): 270-274.
- LIANG CH, FU D H, LIANG B, *et al.* Signal processing system for quantum cryptography [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2001, 16(3): 270-274. (in Chinese)
- [14] 李铁飞, 杨峰, 李伟. 卫星量子通信系统影响因素研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(6): 45-49.
- LI T F, YANG F, LI W. Research on the influence factors of satellite quantum communication system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2016, 23(6): 45-49. (in Chinese)
- [15] FEI Q, DENG Y T, LI H W, *et al.* Speed ripple minimization of permanent magnet synchronous motor based on model predictive and iterative learning controls[J]. *IEEE Access*, 7: 31791-31800.
- [16] 韩京清, 袁露林. 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 268-273.
- HAN J Q, YUAN L L. The discrete form of tracking-differentiator [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1999, 19(3): 268-273. (in Chinese)
- [17] LEVANT A. Robust exact differentiation via sliding mode technique [J]. *Automatica*, 1998, 34(3): 379-384.
- [18] LI Z, LIU L, DEHGHAN S, *et al.* A review and evaluation of numerical tools for fractional calculus and fractional order controls[J]. *International Journal of Control*, 2017, 90(6): 1165-1181.

作者简介:



费 强(1993—),男,山东日照人,博士,2020年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事量子通信系统、高精度伺服系统、空间遥感精密运动控制等方面的研究。E-mail: feiq@jihualab. ac. cn

通讯作者:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,博士生导师,研究员,主要从事望远镜精密跟踪控制技术的研发及电子学设计。E-mail: dyt0612@163. com