

基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统设计

方锦钰, 袁红伟, 安学广

(中国人民解放军 63618 部队, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 当前卫星通信跟踪控制系统对精准度的控制仅能维持在微弧度量级, 跟踪控制精度难以达到用户要求, 为了解决上述问题, 基于扩张状态观测器设计一种新的卫星通信跟踪控制系统; 系统硬件主要设计了控制模块、传感器模块、电源模块与电机驱动模块, 控制模块的核心芯片选用 SXD320F2784 型号, 提高处理频率, 电源芯片为 TDG3320 芯片, 能够保证固定电压转换为可调电压, 传感器模块通过 AHRS 轴向传感器、GPS、信标机组成, 确保传感能力, 利用 L845N 芯片设计电机驱动模块, 增强额定电压; 引入扩张状态观测器, 通过系统初始化、天线经纬度计算、误差比较、卫星通信信号跟踪控制、驱动直流电机实现软件流程; 实验结果表明, 所设计卫星通信跟踪控制系统能够将跟踪精度从原来的微弧度量级提高到纳弧度量级, 动态响应中对角度的控制能力最大可以达到 10^{-4} rad, 稳态响应过程中对角度的控制能力最大可以达到 10^{-11} rad 级别, 有效提升跟踪准确率, 增强系统的干扰抑制能力, 确保控制输入峰值达到与其要求。

关键词: 扩张状态观测器; 卫星通信; 跟踪控制; 干扰抑制

Design of Satellite Communication Tracking Control System Based on Extended State Observer

FANG Jinyu, YUAN Hongwei, AN Xueguang

(Unit 63618 of PLA, Korla 841000, China)

Abstract: Current satellite communication tracking control system can only maintain the accuracy of the micro-arc measurement level, and the tracking control accuracy is difficult to meet user requirements. In order to solve above problems, a new satellite communication tracking control system is designed based on the expanded state observer. The system hardware mainly includes the control module, sensor module, power module and motor drive module. The control module is selected as SXD320F2784 core chip to increase the processing frequency. The power chip is TDG3320 chip, which can ensure that the fixed voltage is converted into adjustable voltage, and the sensor modules of AHRS axial sensor, GPS and beacon machine ensure the sensing ability. The motor drive module is designed with L845N chip to increase the rated voltage. The extended state observer is introduced, and the software process is realized through system initialization, antenna latitude and longitude calculation, error comparison, satellite communication signal tracking control, and driving DC motor. The experimental results show that the designed satellite communication tracking control system can improve the tracking accuracy from the original micro-arc metric level to the nano-arc metric level, and the maximum angle control ability in dynamic response can reach by 10^{-4} rad. The angle control capability can reach by 10^{-11} rad, which effectively improves the tracking accuracy, enhances the interference suppression capability of the system, and ensures that the peak value of control input meets its requirements.

Keywords: expanded state observer; satellite communication; tracking control; interference suppression

0 引言

随着通信质量越来越高, 为了提供更优质、快速的通信服务, 通过架设通信基站、建设通信系统, 解决了部分的移动通信问题。我国地域辽阔, 尤其是地理条件相对偏远的地区, 通信效果更差, 在抗震救灾中等特殊情况下, 仅依靠地面通信系统是远远不够的^[1-2]。卫星移动通信的覆盖能力更广, 通信过程中不会受到外界干扰, 应用在以上特殊条件的环境下, 卫星能够通过一定的通信方式与地面

进行连接, 将采集、探测到的信息通过传输信号发送到地面通信系统中, 进行信息交互。在信息交互过程中, 为了保证卫星通信的稳定性, 地面通信系统需要获取卫星实时状态信息, 由于卫星种类较多、所在轨道位置不同, 其姿态信息、轨道信息等变化也相对较大, 导致卫星跟踪精度较低, 为了提升卫星跟踪精度, 需要建立卫星通信跟踪控制系统来对其进行跟踪控制。

当前已有相关学者对卫星通信跟踪控制系统设计做出了研究。文献 [3] 提出基于参数化设计的卫星通信跟踪控

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2022-01-06。

作者简介: 方锦钰(1996-), 男, 陕西西安人, 大学本科, 助理工程师, 主要从事卫星通信与网络方向的研究。

引用格式: 方锦钰, 袁红伟, 安学广. 基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 92-96.

制系统, 对精、粗两级子系统进行整体设计, 最大限度地利用系统自由度, 实现了阶跃干扰解耦、抑制了复杂干扰、从而提高跟踪控制精准度, 但该系统的运行效率较差; 文献 [4] 提出基于 DSP 控制器的卫星通信系统稳定性控制系统, 给出了系统电机控制原理以及电源电路的设计, 通过 DSP 控制器消除船舶卫星通信系统的噪声信号和误差, 为舰船的通信及定位提供保障。该系统虽然针对硬件优化设计, 但系统运行效率差。

文献 [5] 提出基于精密卫星跟踪和测距应用的卫星系统运动控制系统。为了克服由于系统动力学和位置相关设备变化引起的性能限制, 该系统使用直驱永磁同步电机 (PMSM) 进行高精度定位。该系统对于小扰动状态的运动控制精度较好, 但对于大扰动状态的控制精度较差。文献 [6] 提出用于人造卫星姿态控制的参数化模型预测控制 (MPC)。所提出的控制方案的主要特征包括在每个采样时刻获得最佳解决方案, 尊重结构卫星操作约束, 确保稳定性、跟踪性能和操作可靠性。该系统运行效率较好, 但控制精度有待提升。

为了解决以上问题, 本文设计了基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统。扩张状态观测器作为一种不依赖于系统数学模型的观测器, 由于算法简单很容易应用在实际工程中。

本文首先设计控制模块、传感器模块、电源模块与电机驱动模块, 组成卫星通信跟踪控制系统的硬件。引入扩张状态观测器, 计算天线经纬度, 比较误差, 根据计算出的卫星相对于天线的俯仰角对卫星通信信号进行跟踪控制。

1 基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统硬件设计

基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统硬件结构如图 1 所示。

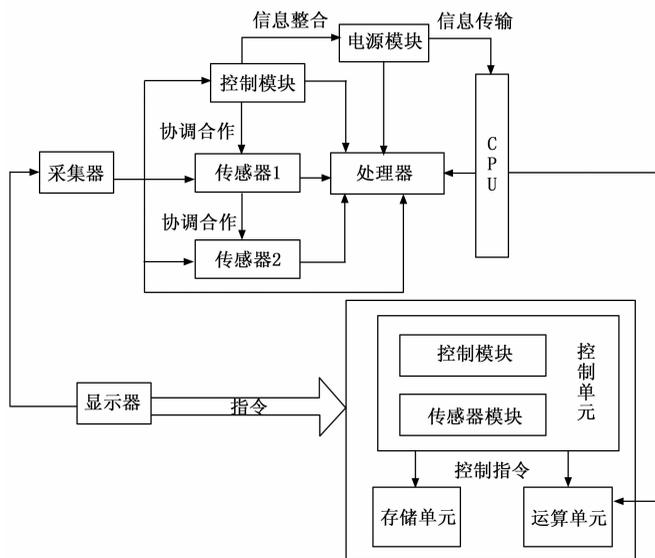


图 1 卫星通信跟踪控制系统硬件结构

1.1 控制模块设计

控制系统的控制模块主要对卫星通信数据、卫星姿态信息等进行控制。控制模块的核心芯片选用三星公司生产的 SXD320F2784, 该控制芯片具有较快的数据处理速率, 可对卫星探测的信息数据进行快速处理, 处理主频最高能达到 200 MHz, 最多可存储 258 Mb 的卫星通信数据, 同时, 该款控制芯片具有较多外设, 例如: SPI、ADC、UAB 等, 为了更好的控制系统的传感器模块与电机驱动模块, 设置了大量的控制接口。

控制芯片结构如图 2 所示。

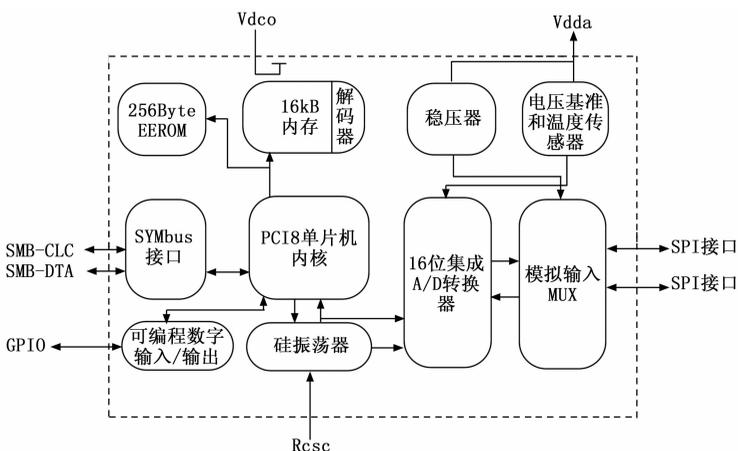


图 2 控制芯片结构

观察图 2 可知, 在模块内的时钟电路内, 传输时钟信号与卫星通信信号, 以低功耗的方式通过 SPI 接口发送到控制芯片上, 经过控制芯片的处理后通过存储器接口发送到 SRAM Flash 上进行存储, 存储完成后, 卫星通信信号与通信数据控制完成, 可进行下一组通信数据的控制^[7]。

1.2 电源模块设计

电源模块主要负责提供电源, 确保电路可以稳定、正常工作, 可将 18 V 输入电压转化为 8 V、4.8 V、3.3 V, 其中, 8 V 电压给系统的传感器模块, 3.3 V 电压给控制模块, 4.8 V 给电机驱动模块。电源模块的输入电压是 12 V, 需要采用转换芯片将 18 V 电压转换成每个模块所需的电压。其中 8 V 电源需要电压稳定, 输出较小的波纹, 8 V 电源转换芯片选用 TD 公司生产的 TDG3320, 电源芯片从固定电压转换成可调电压, 输出的电流更多, 其压差不超过 1.8 V, 可随着电流的增大而增大^[8-9]。

电源模块电路中, 4.8 V 电源转换芯片选用三星公司生产的 LM7362, 该款电源芯片是一种三端线性稳压芯片, 在应用上较为普遍, 可输出较小的波纹, 带载能力较好, 可提供最高 1 A 的输出电流, 具有较高的负载调整能力。3.3 V 电源转换芯片具有较低的功耗与较低的静态电流, 不会随着负载的增加而发生变化, 可对电路进行有效的保护。通过对电源模块的设计, 可实现卫星通信跟踪控制系统的正常运行^[10-12]。

1.3 传感器模块设计

传感器模块包括 AHRS 轴向传感器、GPS、信标机。传感器模块结构如图 3 所示。

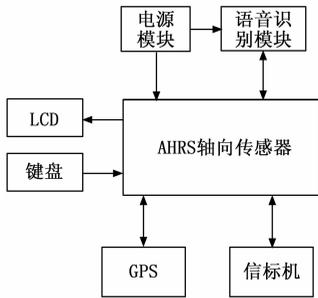


图 3 传感器模块结构

由图 3 可知，轴向传感器可反映卫星的姿态，GPS 负责进行定位，信标机可采集卫星信号并测量信号强度，轴向传感器与 GPS 中采集的卫星通信数据通过串行通信接口进行传输，在传感器信号采集电路中增设了两个串行通信接口，分别与轴向传感器与 GPS 的信号线连接，轴向传感器与 GPS 中的卫星通信数据经过电平转换后，通过采用扩张状态观测器对数据中的卫星姿态信息进行扩张处理，传感器模块的输入电压为 8 V，其中信号采集电路的电压为 4.8 V，电平转换电路的电压为 3.2 V，信号采集电路中含有驱动器与接收器，驱动器中的逻辑电平将卫星姿态信息转换成传感器姿态信号，通过电路中的 SDI 接口传输到接收器中，接收器接收到传感器姿态信号后，通过 EIA-232 电平进行转换并输出^[13]。电平转换电路主要将信标机采集的卫星信号进行 A/D 转换，AD 引脚输入的电压为 1.2 V，信标机输出的电压为 1.8 V。

1.4 电机驱动模块设计

电机驱动模块主要负责卫星天线的快速对星。电机驱动模块的核心芯片选用 SGS 公司生产的 L845N，具有较高的电压与电流，工作电压最高可达到 56 V，电流最高可达到 4 A，瞬时电流可达 6 A，额定功率为 12 W，该款驱动芯片通过逻辑电平对卫星天线信号进行控制，具有逻辑输入端与控制使能端，可在低电阻下检测电压。

芯片能够驱动多个直流电机，引脚 OUT1，OUT2 与电机的输出端口进行连接，INPUT1，INPUT2 控制逻辑电平。直流电机在进行卫星天线的对星时，将卫星天线信号通过引脚 OUT1 从电机中输出，再经过 ENB 使能端的控制，控制完成后经过 INPUT1 输入到逻辑电平中，再通过驱动芯片进行驱动，卫星天线的对星操作即完成^[14-15]。

2 基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统软件设计

在上述卫星通信跟踪控制系统硬件设计的基础上，基于扩张状态观测器对卫星通信跟踪控制系统软件进行设计。在扩张状态观测器基础理论的基础上，通过传感器采集卫星通信数据，应用扩张状态观测器预估天线经度纬度

值，并通过计算得出准确的经度纬度值，进一步计算得出卫星相对于天线的俯仰角，对卫星通信信号进行跟踪控制。

2.1 扩张状态观测器的理论基础

干扰观测的设计具体如下：

当未知的外部干扰 k 能够满足以下假设时：对于系统的未知时变干扰 $k = [k_1, k_2, k_3]^T$ ，有常数向量 J_k 并且满足干扰观测：

$$k^n = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \quad (1)$$

其中： a_n 为外部干扰参数集合； n 为正整数。

采用干扰观测器的干扰估计值定义如下：

$$\hat{k}^{(n-1)} = k^n + \Delta_1 k^n + \Delta_2 k^n + \dots + \Delta_n k^n \quad (2)$$

其中： Δ_1 到 Δ_n 是指未知的外部干扰 d 与其各阶导数的对应估计值。

2.2 基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制实现

基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统的软件流程如图 4 所示。

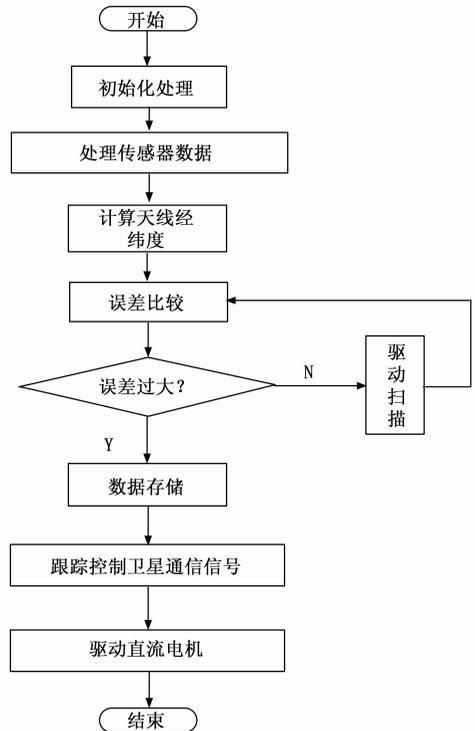


图 4 基于扩张状态观测器卫星通信跟踪控制系统流程

首先，对系统进行初始化。将系统中的控制程序、传感器进行初始化，初始化操作后控制程序的时钟源频率为 30 MHz，将控制程序中芯片的数据处理主频设置成最大值，即 200 MHz，对 GPS 传感器中的卫星通信数据进行处理，使程序 CPU 的时钟频率达到 180 MHz，并调整好外设时钟的比例。进行直流电动机的停机初始化。在中断初始化过程中，需要对卫星天线和使能端的中断服务程序进行设置，进行全局中断与实时中断，使用级联模式对卫星通信信号进行顺序采样，通过 AD 转换电平进行转换^[16]。

然后, 根据系统初始化结果对卫星天线进行初始对星。卫星天线初始对星包括卫星粗对准, 在进行卫星粗准时, 需要确定天线的大概位置, 可通过采用扩展状态观测器计算天线的经纬度, 从而计算卫星相对于天线的角度,

扩张状态观测器预估天线经度值的计算公式为:

$$\kappa = \hat{k}^{(n-1)} + \mathbf{A}\Phi + b \quad (3)$$

其中: b 是姿态控制系统中不确定量和外界干扰的符合量, \mathbf{A} 为数量矩阵。通过天线经度估计值得出天线经度 D 的计算公式为:

$$D = \sqrt{3}\gamma \tan\alpha + \frac{1}{2}\cos\alpha\kappa \quad (4)$$

式中, γ 表示天线与卫星的经度差; α 表示电机横滚角; 根据计算出的天线经度值, 再利用扩张状态观测器计算天线的纬度 B , 其计算公式为:

$$B = \frac{1 - \tan\varphi_{vr}}{\cos\varphi} \quad (5)$$

式中, φ 表示天线方位角; v 表示地心与卫星的距离; r 表示扩张状态观测器参数。根据计算出的天线经纬度获得卫星相对于天线的俯仰角 β 为:

$$\beta = \frac{\sqrt{2}}{2}B + \tan D \cos \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

对于卫星的俯仰角进行计算, 对比估计值, 如果误差较大, 需要利用直流电机在方位轴上进行驱动并扫描^[17-18]。

最后, 根据计算出的卫星相对于天线的俯仰角对卫星通信信号进行跟踪控制。卫星相对于天线的俯仰角计算出后, 对卫星自身的姿态信息进行识别, 如果出现信号扰动情况, 可根据 GPS 中卫星所在轨道位置数据计算天线的角速度, 并得到卫星跟踪信号, 根据卫星跟踪信号的扰动情况驱动直流电机, 使天线转动, 对卫星通信信号进行实时跟踪控制^[19-20]。

3 实验研究

为了验证本文设计的基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统的有效性, 选用本文提出的通信系统和文献 [3] 系统、文献 [4] 系统进行实验对比。实验以 MATLAB 软件作为仿真平台, 在 RarePlanes 数据集中选取 500 MB 卫星通信数据作为实验对象, 进行卫星通信跟踪控制系统的有效性测试。为保证实验结果的有效性, 本文分别从大扰动情形和小扰动情形进行实验。

3.1 大扰动情形

在大扰动情形下, 选取单位阶跃信号进行动态响应, 斜坡信号为 1, 产生的高斯白噪声方差为 1×10^{-5} , 得到的动态响应和稳态响应实验结果如图 5 所示。

根据图 5 可知, 本文提出的控制系统对于卫星通信的控制精度要高于文献对比系统。图 7 结果表明, 在动态响应过程中, 基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统对于角度的控制能力可以达到 10^{-4} rad 级别, 文献 [3] 系统的控制能力仅能达到 10^{-2} rad 级别, 文献 [4] 系统的跟踪控制精度为 10^{-2} rad 级别。在稳态响应过程中, 基于扩张

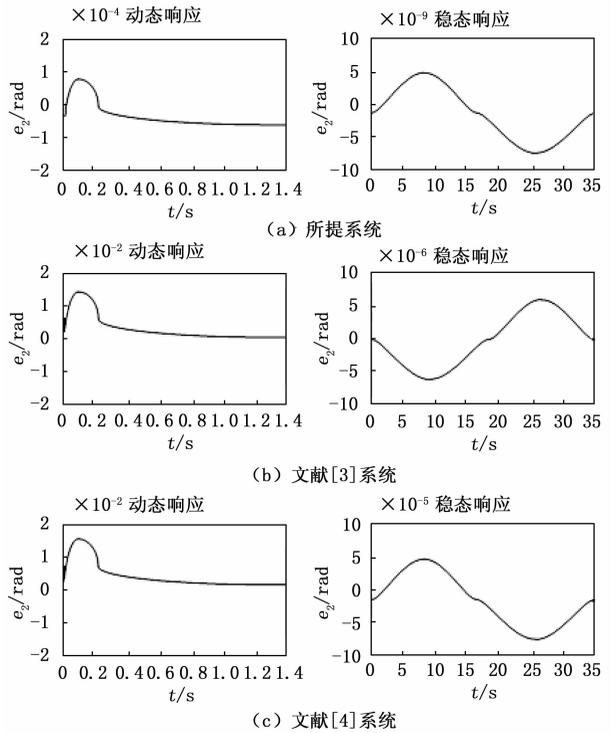


图 5 大扰动情形下控制精度实验结果

状态观测器的卫星通信跟踪控制系统对于角度的控制能力可以达到 10^{-9} rad 级别, 文献 [3] 系统的控制能力仅能达到 10^{-6} rad 级别, 文献 [4] 系统的跟踪控制精度为 10^{-5} rad 级别。本文提出的控制系统控制过程十分平稳, 由此可见, 在大扰动情形下, 本文提出的控制系统控制精度要远远高于文献对比系统控制精度。

3.2 小扰动情形

在实际工程中, 小扰动情形相对较多, 相比较于大扰动情形, 小扰动情形受到的干扰量更小。选取单位阶跃信号进行动态响应, 斜坡信号为 0.017, 产生的高斯白噪声方差为 1×10^{-6} , 得到的动态响应和稳态响应实验结果如图 6 所示。

根据图 6 可知, 在小扰动情形下, 本文提出的控制系统对于卫星通信的控制精度更高, 始终高于文献对比系统, 在动态响应过程中, 对于角度的控制能力可以达到 10^{-4} rad 级别, 在稳态响应过程中, 对于角度的控制能力可以达到 10^{-11} rad 级别。而文献 [3] 系统在动态响应过程中, 对于角度的控制能力为 10^{-2} rad 级别, 在稳态响应过程中, 对于角度的控制能力为 10^{-8} rad 级别; 文献 [4] 系统在动态响应过程中, 对于角度的控制能力为 10^{-2} rad 级别, 在稳态响应过程中, 对于角度的控制能力为 10^{-7} rad 级别。由此可见, 在小扰动情形下, 本文提出的控制系统控制精度要远远高于文献对比系统控制精度。

上述实验结果表明, 在卫星跟踪信号处于大扰动情况下时, 本文提出的控制系统控制过程平稳, 动态响应中对角度的控制能力可以达到 10^{-4} rad, 稳态响应过程中对角度

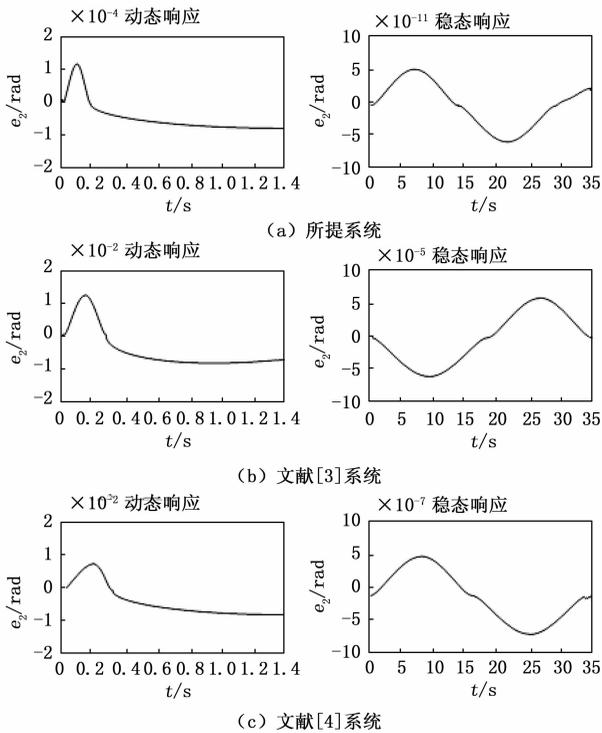


图 6 小扰动情形下控制精度实验结果

的控制能力可以达到 10^{-9} rad 级别；在卫星跟踪信号处于小扰动情况下时，卫星跟踪信号处于大扰动情况下时，本文提出的控制系统控制过程平稳，动态响应中对角度的控制能力可以达到 10^{-4} rad，稳态响应过程中对角度的控制能力可以达到 10^{-11} rad 级别。本文设计的基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统无论在何种扰动情况下，在动态响应及稳态响应过程中都能保证稳定且高精度的跟踪控制。本文设计的跟踪控制系统抛弃了传统的跟踪控制系统利用扩张状态观测器分析参数目标要求，提高跟踪控制的精准性，除此之外，在控制过程，本文设计的系统还考虑了阶跃干扰解耦和控制增益问题，因此控制精度要远远高于文献对比系统精度，更加适合应用到实际的卫星通信跟踪控制工作中。

4 结束语

卫星通信对我国偏远地区的信息交互、抗震救灾中的遥感检测具有重要意义，但随着交互信息数据流量的增加，传统的电信号交换跟踪方式无法完成卫星通信跟踪任务，因此本文利用扩展状态观测器设计了基于扩张状态观测器的卫星通信跟踪控制系统，该系统实现了卫星探测数据与地面数据的交互，提升了数据交互的质量，实现了卫星通信的跟踪控制，在卫星通信领域具有重要作用。

本系统存在的不足之处：卫星通信信号在传输过程中会出现一定大小的线性扰动，线性扰动会降低信号的阻抗与损耗，信号传输会受到抑制，在下一次的研究中将重点对此进行研究。

参考文献：

- [1] 董文瀚, 童颖奇, 朱鹏, 等. 基于扩张状态观测器的运输机多故障容错控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46 (5): 1005-1017.
- [2] 章楚, 贺建武, 段俐. 基于扩张状态观测器的无拖曳系统参数辨识 [J]. 空间科学学报, 2019, 39 (5): 670-676.
- [3] 段广仁, 王建宇, 赵天一, 等. 卫星光通信精确跟踪控制系统的参数化综合优化设计 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (3): 469-480.
- [4] 何杰, 田丰. 船舶卫星通信系统的稳定性控制系统开发 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (18): 140-142.
- [5] RIEL T, GALFFY A, JANISCH G, et al. High Performance Motion Control for Optical Satellite Tracking Systems [J]. Advances in Space Research, 2019, 65 (5): 1333-1343.
- [6] RODRIGUES R, MURILO A, LOPES R V, et al. Hardware in the Loop Simulation for Model Predictive Control Applied to Satellite Attitude Control [J]. IEEE Access, 2019, 7: 157401-157416.
- [7] 熊文俊, 赵辉. 基于北斗卫星的航天器监控系统数据通信技术 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 80-83.
- [8] 饶浩, 张岩, 张津舟, 等. 一种应用于海上浮标的卫星中继通信终端 [J]. 电讯技术, 2019, 59 (10): 1145-1150.
- [9] 钟良玉, 郝时光, 宋志操. 基于卫星测试的多路信号产生技术 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17 (1): 67-71.
- [10] 柳晨光, 初秀民, 毛庆洲, 等. 无人船自适应路径跟踪控制系统 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (8): 234-245.
- [11] 谭聪, 杜佳璐, 许桂贤, 等. 基于ESO和动态逆的欠驱动船舶航迹跟踪控制设计 [J]. 船舶工程, 2020, 42 (8): 129-135.
- [12] 王青, 刘雨昂, 刘晨, 等. 基于扩张状态观测器的变形机翼抗饱和控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (3): 619-625.
- [13] 李磊, 吕婷婷, 张剑. 应用于智能浮标的卫星通信定位系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39 (1): 97-100.
- [14] 段凯原, 胡利民, 陈彦勇, 等. 微小型UUV无刷直流电机驱动控制系统 [J]. 电机与控制应用, 2020 (4): 35-39.
- [15] 张小红, 曹英健. 航天电液伺服系统直流无刷电机控制驱动策略研究 [J]. 液压气动与密封, 2020, 40 (3): 27-31.
- [16] 吕春婉, 任寒景, 欧阳正勇, 等. 一类不确定随机非线性系统的采样扩张状态观测器设计与观测误差的收敛性分析 [J]. 数学的实践与认识, 2019, 49 (13): 273-283.
- [17] 王锦, 张伸. 基于变增益观测器的高超声速飞行器输出反馈控制 [J]. 宇航学报, 2019, 40 (5): 543-553.
- [18] 毛海杰, 李炜, 蒋栋年, 等. 基于线性扩张状态观测器的永磁同步电机状态估计与性能分析 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (10): 2155-2165.
- [19] 张文杰, 鲁天宇, 夏群利. 基于扩张状态观测器的反预警滑模制导律 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41 (5): 156-162.
- [20] 郭超勇, 刘继奎, 程俊波, 等. 卫星激光通信粗跟踪系统复合控制策略 [J]. 光学精密工程, 2020, 28 (4): 195-202.