

基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计

张 豪, 冯娜娜

(延安大学 物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 针对现有卫星光通信跟踪控制系统存在光通信信号数据分割误差大, 跟踪控制精度降低的问题, 提出基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计; 采用 DPS 嵌入式技术构建基于中间节点预测数据处理的硬件平台, 利用 MCU 作为中间节点预测数据的指挥调度单元; 将 CDD 光学传感器应用于光通信光谱信号特征采集单元; 通过 STM32F103RBT6 主控对 CDD 光学传感器的高精度光通信光谱特征信号处理; 通过 73M2901CE-IGV/F 跟踪信号精度调制 IC 完成对高精度跟踪信号的控制调节; 对设计系统控制精度的多场景进行测试; 数据表明, 设计系统能够支持光通信信号强度大于 32% 小于 50% 的条件下, 保持通信跟踪控制指标为 0.92, 最大化接近标准指标量 1, 在 600 个测试数据量下, 所设计系统的检测耗时为 1.2 s, 说明所设计跟踪控制的精度较高, 控制耗时较短, 满足光通信实际跟踪控制系统的应用要求。

关键词: 中间节点预测; 光通信; 精确跟踪; 控制系统

Design of Accurate Tracking Control System for Satellite Optical Communication Based on Intermediate Node Prediction

Zhang Hao, Feng Nana

(School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: Aiming at the problems of the existing satellite optical communication tracking control system that the optical communication signal data segmentation error is large and the tracking control accuracy is reduced, a satellite optical communication accurate tracking control system design based on intermediate node prediction is proposed. Use DPS embedded technology to build a hardware platform based on intermediate node prediction data processing, use MCU as the command and dispatch unit of intermediate node prediction data; apply CDD optical sensor to optical communication spectral signal feature acquisition unit. Through the STM32F103RBT6 master control, the high-precision optical communication spectral characteristic signal processing of the CDD optical sensor; through the 73M2901CE-IGV/F tracking signal precision modulation IC to complete the control and adjustment of the high-precision tracking signal. Test the control accuracy of the design system in multiple scenarios. The data shows that the designed system can support the optical communication signal strength greater than 32% and less than 50%, maintaining the communication tracking control index of 0.92, maximizing close to the standard index 1. Under the condition of 600 test data, the designed system's detection time-consuming is 1.2 s, which shows that the designed tracking control has higher precision and shorter control time, which meets the application requirements of the actual tracking control system for optical communication.

Keywords: intermediate node prediction; optical communication; precision tracking; control system

0 引言

卫星作为外空数据交换服务载体, 通过光通信方式同地面建立连接, 将所探测, 采集、捕获的信息经过激光信号回传至地面接收点, 实现卫星数据与地面间的一次交互。此种技术就是卫星通信常用的卫星光通信技术。由于卫星的种类、所处轨道、轨道位置、功能性的不同, 地面接收点需要实时高精度获取卫星状态数据, 并对其进行姿态、轨道、动力、任务调整, 使其具备相应任务条件。随着近年来卫星光通信数据量的增大, 卫星跟踪精度不断提高, 传统电信号交换的跟踪方式^[1], 无法适应高流量下的卫星

光通信跟踪任务, 信息流交互速率的提升加大了光通信数据节点在信道内部的分布面积, 节点交互面的延伸改变了数据在信道内的分布特征, 传统电信号交互记录特征^[2]在新特征下会产生节点错位, 错位产生的误差量会影响控制信号与跟踪信号的分割匹配, 降低控制精度。

文献 [3] 提出了卫星光通信精确跟踪控制系统参数化设计方法, 两级子系统的总体设计充分利用了系统中的设计自由度。通过全面优化这些设计自由度, 可以实现阶跃干扰的去耦和复杂干扰的抑制, 以及不敏感的磁极配置和控制。诸如最小化增益的各种设计要求已大大提高了对准

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-03-01。

作者简介: 张 豪(1998-), 男, 陕西宝鸡人, 本科, 主要从事移动通信方向的研究。

引用格式: 张 豪, 冯娜娜. 基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 126-130, 145.

精度。该方法的控制精度较好, 但系统运行效率较差。文献 [4] 在等效误差模型的基础上提出了受限指令预设性能控制律设计方法。引入受限指令滤波方法, 综合考虑建模误差和外部扰动, 引入连续双曲正切函数逼近饱和函数, 利用自适应率对模型的未知参数进行估计, 最后引入预设的性能方法来分析船舶的瞬态性能。该方法具有较好瞬态性能, 但整体控制精度该有所提升。

针对光通信特点与数据控制节点特征, 通过采用中间节点预测技术, 提出一种基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计, 围绕中间节点预测进行软硬件设计, 并通过数据证明, 设计系统的可行性与优越性。

1 基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统框架设计

基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统根据功能性将整体框架分为 3 部分, 如图 1 所示。

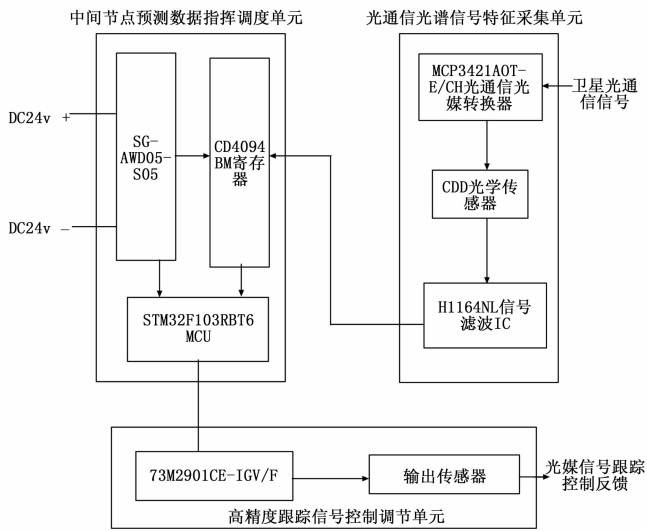


图 1 硬件框架结构

图 1 中整体系统基于中间节点预测技术, 硬件平台采用的 STM32F103RBT6 主控基于卫星光通信拓扑网络交互协议, 因此需要通过 MCP3421AOT-E/CH 光通信光媒转换器对卫星光通信信号进行光媒图谱转换, 才可实现 CDD 光学传感器对光媒信号的图谱特征识别。为了保证识别后的光媒特征图谱能够被 STM32F103RBT6 主控认知, 采用 H1164NL 信号滤波 IC 对图谱信号进行波束的滤波转换处理, 使其信号参量满足 STM32F103RBT6 主控处理变量要求。在硬件架构的数据输出参量上, 设计采用自定义逻辑模块, 可根据控制终端参量通过逻辑编辑工具自行定义输出逻辑与相关参量, 以此保证硬件框架的兼容性与扩展性。由光通信光谱信号特征采集单元实现卫星光通信数据的采集, 由中间节点预测数据指挥调度单元实现对数据的特征信号处理, 并通过光媒信号跟踪控制反馈实现高精度跟踪信号的控制调节, 共同实现了基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统框架设计。

2 硬件配置与参量

设计系统的硬件框架是基于中间节点预测技术设计, 其中硬件框架的前端为高精度跟踪信号控制调制模块, 基于网络通信技术^[5]构建的拓扑网络, 将数据媒光信号进行相应转换处理, 并引入图像特征分割处理技术硬件, 完成对光媒信号特征区域的锁定, 再由滤波器完成对光媒特征信号的滤波转换处理, 使其顺利到达中间节点预测数据指挥调度单元, 通过 MUC 对信号中特征量的分割, 结合控制数据指令节点特征, 对跟踪数据作出最佳预测, 最后通过高精度跟踪信号控制调节单元内部硬件, 完成对预测数据量与控制量信号的优化输出, 从而达到提升控制精度的效果。以下对 3 个硬件单元中核心硬件功能与参量注释如下。

2.1 STM32F103RBT6 高精度光通信光谱信号特征信号处理主控

用于控制系统核心 MUC, 对光通信光媒特征谱初级处理的跟踪信号特征与对应控制信号指令节点特征进行预测, 为相应的处理算法与策略执行提供对应场景与环境的创建与支持。

2.2 MCP3421AOT-E/CH 光通信光媒转换器

基于卫星通信模式为光通信, 通信数据的传输媒介为光媒, 而 CDD 传感器可处理数据参量为模拟量处理范围, 因此需要通过数据转换手段, 将网络数字量转换为模拟量, 创建变量转换场景。基于上述要求, 设计采用 MCP3421AOT-E/CH 光通信光媒转换器, 其工作状态下变量转换示意图如图 2 所示。

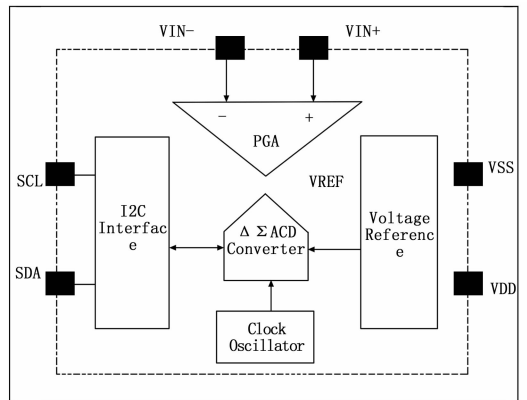


图 2 MCP3421AOT-E/CH 光通信光媒转换器工作状态下变量转换示意图

2.3 CDD 光学传感器

通过 CDD 光学成像技术, 利用不同像素点在暗通道中分布结构特点, 对光信号数据节点分布特征光谱采集, 将光信号中跟踪数据分布结构以图谱形式呈现, 便于跟踪信号数据分布特征的高精度分割。利用 CDD 传感器对光源信号的感知灵敏度, 快速对卫星光通信光媒数据作出反应, 配合滤波器以及相应算法, 完成对光媒数据中跟踪数据分布结构的图谱构建。其处理原理概括图如图 3 所示。

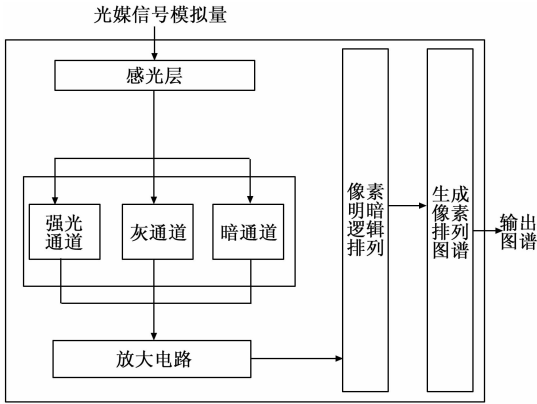


图 3 CDD 光学传感器光媒数据特征图谱处理原理概括图

2.4 H1164NL 信号滤波 IC

主要用于光通信光媒数据中，跟踪数据节点像素化分布特征图谱模拟量的数字化转换滤波处理场景支持。

表 1 H1164NL 信号滤波 IC 技术参数

制造商:	Pulse
RoHS:	是
频率范围:	1 kHz to 100 MHz
电感:	350 μ H
初级线圈阻抗:	1 Ohms CT
次级线圈阻抗:	1 Ohms CT
绝缘电压:	1.5 kV
最小工作温度:	0 C
最大工作温度:	+70 C
通道数量:	4 Channel
应用:	100 Base-TX
封装/箱体:	28.58 mm \times 116 mm \times 5.84 mm
长度:	28.58 mm
宽度:	12.19 mm
高度:	5.84 mm
封装:	Bulk
屏蔽:	Unshielded
商标:	Pulse Electronics
产品类型:	Audio&Signal Transformers
子类别:	Transformers
针脚:	16 针

2.5 73M2901CE-IGV/F 跟踪信号精度调制 IC

73M2901CE-IGV/F 跟踪信号精度调制 IC 主要担负着 MUC 主控处理数据量的精度提升任务。其主要对控制变量与跟踪信号特征量的匹配度进行精度优化，通过硬件自身设计参量，使控制精度值成为恒定量，避免外界因素对结果数据的扰动，控制误差值在固定的范围内。

3 系统软件算法定义设计

为了使上述硬件在卫星光通信跟踪系统中发挥最大效用，根据硬件技术参量特点与中间节点预测技术要求，对设计系统的软件算法进行定义设计。

3.1 中间节点预测指令交互算法

为了有效解决传统卫星光通信跟踪控制系统控制精度降低问题，结合对问题产生现象的特征，设计系统软件部分，适配中间节点预测指令交互算法，通过算法的适配与定义设计，达到对光通信跟踪节点的中间环节变量的预测，得到跟踪节点在光媒图谱上的分布特征。设计算法的实现步骤如下：

光通信节点具有的网络节点属性，将光媒数据节点所在链路定义为网络链路空间，根据节点交互过程中，需要发送 KRY 指令集^[6]与 YES 指令集^[7]的特点，中间节点预测指令空间 NIQ 中，交互指令集之间突发信息交互流程如图 4 所示。

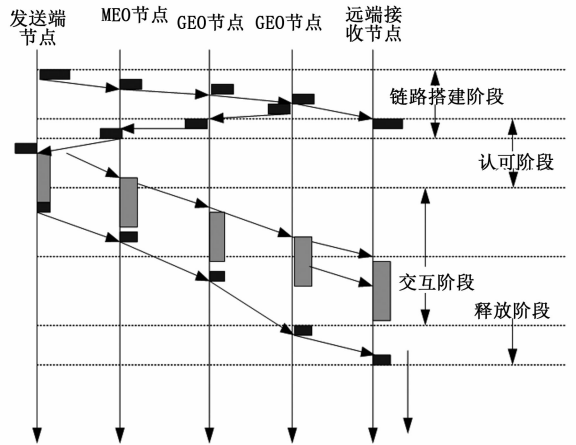


图 4 交互指令集之间突发信息交互流程

当节点数据包在网络链路空间外围生成突发信息交互指令集时，会预先向远端发送一组突发信息指令控制包 (MVQ)。MVQ 会对交互过程中信道内的全局信息进行收集，任意一个中间节点会对 MVQ 采集信息的可信度进行确认，经过认可后才能进入链路空间的下一个链路层，此过程还会对链路空间中的信息数据进行信息节点与经过链路层信道状态的预测，若该中间节点满足整个信息链路空间的交互规则，及时向发送端反馈节点认可信息，与此同时 MVQ 不间断向远端发送链路空间信息资源信息；反之 MVQ 不间断采集链路信道数据，并在链路层的下一节点处进行采集数据的中间节点预测。认可后的资源信息反馈到发送节点后，随即将突发信息数据指令集 (BDP) 将确认信道路径传输至远点接收节点，同时发出一条释放信息，对预测节点链路信息进行清除。至此完成一次中间节点预测指令的交互。中间节点预测指令预测交互算法流程如图 5 所示，软件定义逻辑顺序如下：

- 1) BVQ 确认后对网络链路空间进行拓扑初始化；
- 2) 参照路径最优原则检索资源节点与远端接收节点的最佳 T_{df} ；
- 3) 通过 NIQ 指令集获取可支持中间节点的信息指令数据量，同时将认可信息反馈至发送节点；
- 4) 发送端根据认可信息 T_{df} 发送 MFQ 同时释放信息

清除链路预测资源。

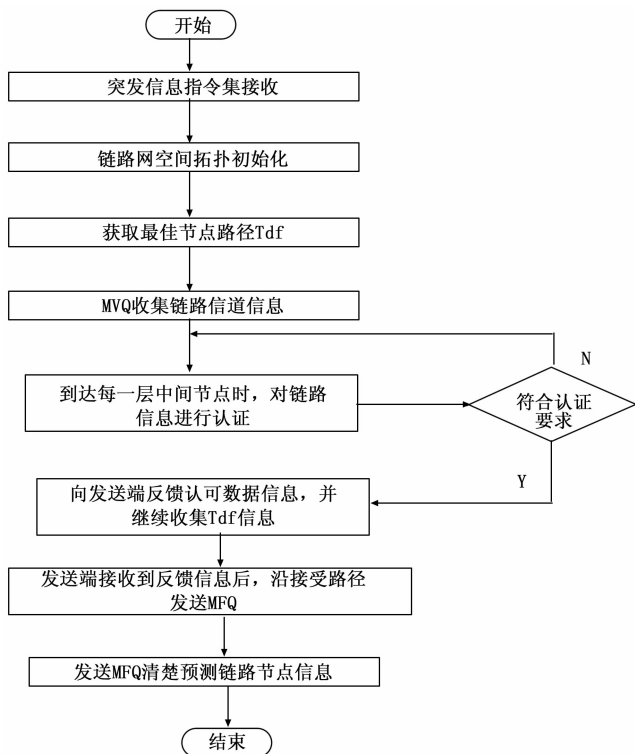


图 5 中间节点预测指令预测交互算法流程

3.2 控制误差优化策略设计

完成中间节点预测指令交互计算后, 对交互后的跟踪特征数据进行控制量匹配策略的优化, 以期提升控制量的精准度。策略设计匹配硬件为 73M2901CE-IGV/F 跟踪信号精度调制 IC。可将其视为 73M2901CE-IGV/F 跟踪信号精度调制 IC 驱动策略的设计。具体设计如下:

令控制指令基点与跟踪信息节点间的最近路由为 T_{df} , 且此时任意信道仅满足单向数据传输条件。此环境变量条件下, 各计算参量定义如下:

y_{mq} : 处于任意节点 MVQ 所对应的时间点下, 全局时间与链路时间对应值相同。

y_{de} : 代表随机一个节点光通信交叉矩阵对应的交互时间。

y_{sy} : 节点数据包在链路空间外围突发信息节点生成所耗时间。

y_m : MFQ 内部链路信道中的节点传输时间。

y_{pgg} : MVQ 与对应 MFQ 之间传输所需的时间的最小系数。

y_q^k : 节点 n 与节点 k 之间传输距离所需时间的误差量。

特殊变量: y_{mq} 计算单位为百纳秒量级, y_{de} 计算单位为几微秒量级, y_q^k 计算单位为 $3.0 \mu\text{s}/\text{km}$ 。

在 INP 数据指令集中, 分别由卫星跟踪数据指令集 YSE 与控制指令集 KRY 两方程混合式构成, 二者之间的匹配程度由中间节点中处于 l 位置的突发信息数据流的生成时间与传输消耗用时决定^[8-10]。假设 N 为发送端节点到中间

节点的频率, z 为中间节点到控制指令节点的频率, i 为数据节点与控制节点间的匹配系数。则二者匹配过程中的数据匹配误差 y_{NIQ} 为:

$$y_{NIQ} = y_{sy} + 2 \sum_{N^a \in T_a} y_q^{nk} + \sum_{N^a \in T_a} y_q^{nk} + y_m + y_{pgg} \quad (1)$$

其中: 若 $2 \sum_{N^a \in T_a} y_q^{nk} \geq zy_{mq} + y_{de}$, 则 $y_{pgg} = 0$; 否则有:

$$y_{pgg} = (zy_{mq} + y_{de}) - 2 \sum_{N^a \in T_a} y_q^{nk} \quad (2)$$

设计算法中, 当 $a = i$ 时, 控制指令集系数与 YES 信息数据指令集的匹配系数相同; 当 $a = 0$ 或 $z = i$ 时, 跟踪数据指令集与控制指令集 KRY 的最小系数量^[11-13]相同。

假设 D_n 为控制网络空间状态系数, 分别由 MVQ 处于第 z 个中间节点处所获取的发送节点与控制指令节点间的匹配信息 D_{Vn} 同此节点与控制指令节点相邻数据信息状态系数 D_{Qn} 构成, 其函数关系可描述为 $D_n = g_n(D_{Vn}, D_{Qn})$ 。 R_n 为此过程的精度指标量, 其中 $n = 1, 2, 3 \dots$ 代表指标类别^[14-15]。

为了更加便捷地完成匹配精度优化, 设计算法中令 $DOQ(D_n, E_n)$ 代表中间节点包含控制网络空间状态系数 D_n 对应阈值大于精度指标量 R_n 。若该节点符合 $DOQ(D_n, E_n)$ 定义条件时, 引入精度指标量的权重量 ξ_n , 可得到卫星跟踪信息节点与控制指令节点间的最佳匹配函数 $\sum \xi_n |D_n - R_n|$, 其对应值便是控制量优化后的更新系数量^[16-17]。

3.3 软件实现

以 C++ 作为编程语言, 实现软件设计, 具体流程如图 6 所示。

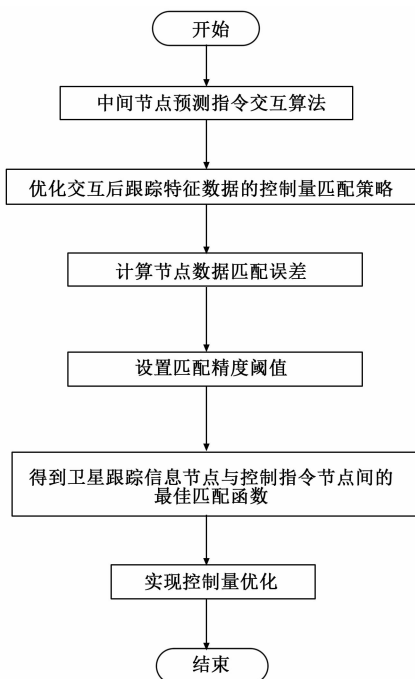


图 6 软件设计流程图

如图 6 所示, 在 C++ 软件中编写软件设计程序, 通过指令交互算法实现中间节点预测, 为优化卫星光通信数据控制量匹配策略, 计算节点数据匹配误差, 最后得到卫星跟踪信息节点与控制指令节点间的最佳匹配函数, 即为卫星光通信最优控制量。

4 系统性能测试

通过 MATLAB 仿真测试平台对基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计的有效性进行数据测试。采用文献 [3] 方法、文献 [4] 方法作为实验对比方法, 从卫星光通信精确跟踪控制系统的控制精度和控制耗时两方面验证所提方法的有效性。

4.1 测试场景搭建

测试场景搭建采用 Keil 编辑语言进行测试工具编写。通过编写的 UDP 信号测试工具创建测试场景。Keil 测试工具编辑场景参量如表 2 所示。

表 2 Keil 测试工具编辑场景参量

场景量	测试量值	指标量
逻辑量总键数量	215 423 62	—
逻辑层数量	3	1~6
响应定义量	3 ms	30°
匹配逻辑量	2	1~3
场景测试时间	0~180 min	≤300 min
报告数据生成时间量	≤30 min	≤30 min

4.2 测试数据设定

测试场景中导入测试数据, 数据配置如下: 测试数据样本规模为 200; 单次测试群组构成数量为 10; 测试周期为 5; 测试时间为 2 小时; 测试标准指标量为 2.3。测试场景搭建示意图如图 7 所示。

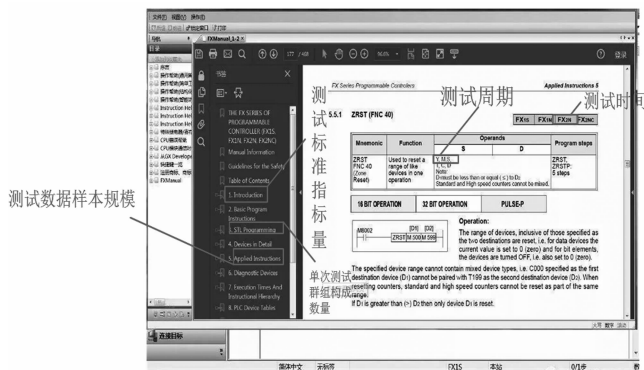


图 7 测试场景搭建示意图

图 7 对测试工具场景创建后台数据设置项进行了详细标注。

4.3 测试结果与分析

在搭建的测试环境中, 分析配置测试量在测试样本系统 (本文提出设计的控制系统) 上的效果。对 0~120 min 内的控制效果进行分析, 根据控制量斜率对应值, 结合指标量对比后得出结论。测试结果如图 8 所示。

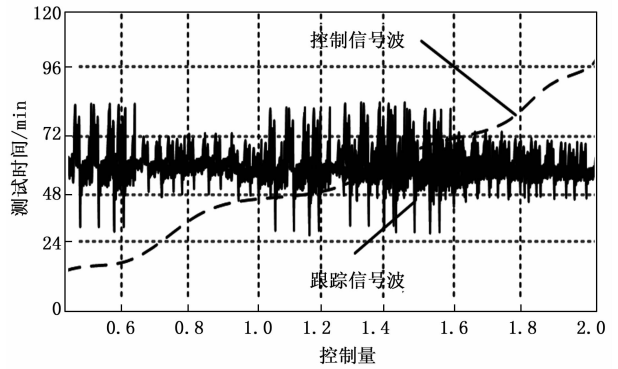


图 8 控制精度测试结果

由图 8 可知: 在测试场景中, 卫星光通信跟踪信号波与控制信号交错环境下, 120 分钟测试中控制量初始值为 1.513; 24 min 对应的控制量为 1.501; 48 min 对应的控制量为 1.482; 72 对对应的控制量为 1.473 4; 96 min 对应的控制量为 1.436; 120 min 对应的控制量为 1.427; 通过对上述对应控制量值的分析发现, 设计系统控制精度随着控制时间增加, 控制精度逐渐趋近于控制标准指数 1.4, 且控制量变化幅度较为明显, 使控制量收尾系数为 1.427, 结合测试图跟踪信号波动状态可知, 测试场景为复杂环境的测试, 因此, 正常环境下控制量会有 0.013~0.021 的提升空间。

在此基础上, 测试 3 种方法的控制耗时, 得到伏笔结果如图 9 所示。

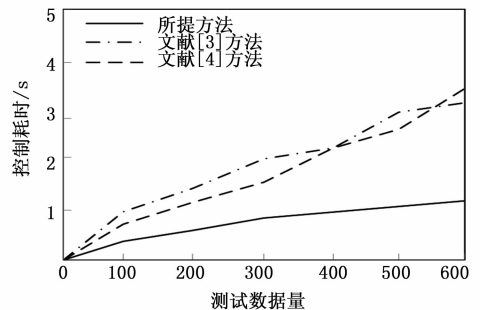


图 9 控制耗时测试结果

分析图 9 可知, 随着测试数据量的增加, 文献 [3] 方法、文献 [4] 方法的控制时间越长, 而所设计系统的控制耗时一直保持平稳增长。在 600 个测试数据量下, 所设计系统的检测耗时为 1.2 s, 远远小于文献对比方法, 表明所设计系统的卫星光通信精确跟踪控制效率较好。

5 结束语

卫星光通信高精度跟踪能够获取卫星状态实时数据, 在地空任务数据交换, 遥感远程任务部署中具有重要作用, 为天气变化数据预测等信息交互, 提供高精度数据支持。因此卫星光通信跟踪控制的精准度, 直接决定着数据信息交互质量。本文提出基于中间节点预测的卫星光通信精确跟踪控制系统设计, 以光源作为光通信数据载体, 通过光通

(下转第 145 页)