

卫星光通信系统振动源的模拟设计

刘 洋^{1,2} 宋延嵩^{1*} 佟首峰¹ 常 帅^{1,2} 于笑楠^{1,2} 安 喆²

¹ 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了便于空间激光通信中捕获、跟踪性能的测试,提出了一种卫星振动模拟源系统设计方案。该系统主要由上位机借助 LabVIEW 软件解析标准振动功率谱密度函数,将模拟出的平台振动信号传给以 STM32F4 为核心的控制系统,驱动振镜进行俯仰、方位摆动。借助欧空局设计的 SILEX 平台模型,推导验证了本方案的可行性,并搭建实验现场,通过探测器对光斑脱靶量进行了实时监测,分析了脱靶量功率谱,同时对在实际应用中产生的伪随机序列进行了优化与处理。实验结果表明,设计的振动源幅值精度优于 $2 \mu\text{rad}$,模拟结果真实有效。另外由于其频率可调节,模拟系统幅度可达 $\pm 10 \text{ mrad}$,故易于模拟不同的标准模型,为复合轴捕获、跟踪和瞄准 (APT) 的实验室验证提供了条件。

关键词 光通信; 模拟源; 卫星振动; 捕获、跟踪和瞄准; SILEX 平台

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1206006

Simulation Design of Vibration Source in Satellite Optical Communication System

Liu Yang^{1,2} Song Yansong¹ Tong Shoufeng¹ Chang Shuai^{1,2} Yu Xiaonan^{1,2} An Zhe²

¹ Key Laboratory of Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to test the performance of acquisition and tracking in space laser communications, a satellite vibration analog source system is proposed and designed. The system gets standard vibration power spectral density function by upper computer with LabVIEW software, and then transmits the simulated signals of vibration platform to control system with the core of STM32F4 in order to make the galvanometer swing for pitch and azimuth. Based on SILEX platform model designed by European Space Agency (ESA), the feasibility of the program is derived and verified. Also an experimental site is built to monitor the miss distance in real time by detectors and analysis the miss distance power spectrum. Simultaneously, the pseudo-random sequence in practical applications is processed and optimized. The experimental results show the amplitude accuracy of vibration source is better than $2 \mu\text{rad}$ and the system simulated results are real and effective. In addition, the amplitude of analog system can reach $\pm 10 \text{ mrad}$ since its frequency can be adjusted. Therefore the system can easily simulate different standard models and provide the conditions for acquisition, pointing and tracking (APT) verification in the laboratory.

Key words optical communications; analog source; satellite vibration; acquisition, pointing and tracking (APT); SILEX platform

OCIS codes 060.2605; 140.3295; 140.3460; 280.3400; 350.6090

收稿日期: 2016-05-26; 收到修改稿日期: 2016-09-06

基金项目: 国家 863 计划(2014AA701178)

作者简介: 刘 洋(1991—),男,博士研究生,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: hyyMichael9151@gmail.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事空间遥感与激光通信等方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

* 通信联系人。E-mail: songyansong2006@126.com

1 引 言

在空间激光通信系统中,对动态跟踪精度要求很高,精度通常需达到微弧度量级,这就要求伺服系统能够抑制搭载平台的低频振动和高频扰动,其中平台的平动对于远距离激光通信系统可以忽略不计,文献[1-3]主要考虑了角振动对视轴的影响。卫星振动模拟源主要用来模仿已有在轨卫星的标准角振动,为捕获、跟踪和瞄准(APT)控制系统精度的提高以及链路的测试提供真实的仿真环境^[4]。另外,卫星振动模拟源还可以模仿特定卫星的振动状态,检测接收机的捕获性能,同时也可以作为标准,检测系统的动态跟踪精度^[5-6]。

现阶段,大部分卫星振动模拟源是通过滤波器对高斯白噪声进行滤波来实现的^[7-9],这种方法若滤波系统选用不当,往往会引入一些额外噪声,不能很好地再现卫星的运动状态。本文提出一种基于 LabVIEW 的卫星振动模拟源系统,将解析出的时域信号实时传递给以 STM32F4 为核心的控制系统驱动振镜,通过控制振镜俯仰和方位的角度变化来模拟实际在轨卫星的角振动状态。这种方法的优点是直接利用已测得的振动功率谱密度模型进行处理,避免了再建模型引入的额外噪声,同时通过优化可以实现近似平滑的曲线输出,在对伪随机序列进行处理之后,可使模拟结果真实有效。另外由于频率易调节,该系统可选取不同的振动模型。

2 卫星振动模拟原理分析

本文采用的振动功率谱模型是欧空局(ESA)设计的 SILEX 平台^[10],其振动功率谱密度为

$$S(f) = \frac{160^2}{1 + (f/f_0)^2}, \quad (1)$$

式中 $f_0 = 1$ Hz, f 是频率, $s(f)$ 的单位是 $(\mu\text{rad} \times \mu\text{rad})/\text{Hz}$ 。将(1)式变换可得到

$$F(\omega) = \sqrt{S(f) \times f} = \sqrt{160 / \left(\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\omega}{2\pi} \right)}, \quad (2)$$

其中 ω 是角频率, $F(\omega)$ 代表不同角频率下的幅值函数,单位为 μrad ,由傅里叶逆变换可得

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \sqrt{160 / \left(\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\omega}{2\pi} \right)} \right| \cos(\omega t) d\omega + j \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \sqrt{160 / \left(\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\omega}{2\pi} \right)} \right| \sin(\omega t) d\omega, \quad (3)$$

由于(3)式第二个积分中的被积函数是 ω 的奇函数,所以积分值为零,第一个积分中的被积函数是 ω 的偶函数,故有

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \left| \sqrt{160 / \left(\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\omega}{2\pi} \right)} \right| \cos(\omega t) d\omega, \quad (4)$$

由(4)式可看出此信号是由不同角频率的余弦分量组成的,它包括了角频率从零到无限大的所有角频率分量,且 $\left| \sqrt{160 / \left(\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\omega}{2\pi} \right)} \right| \pi d\omega = 2 \left| \sqrt{\frac{160}{1/f + f}} \right| df$ 相当于各分量的振幅。

通过以上的理论推导发现,对于一个标准的功率谱密度函数可拆分成 n 个不同频率和幅值的余弦波叠加,当 n 趋近于无穷时,将频谱信号转化成时域信号,利用此时时域谱线就可以模拟出卫星平台的振动信号。

3 卫星振动模拟源设计

如图 1 所示,振动模拟源系统由信号产生单元、信号处理模块以及执行机构组成。其中信号产生单元由软件编程解析标准卫星振动功率谱密度函数,如(1)~(2)式变换得到幅值与角频率的函数 $F(\omega)$,然后建立一个参变量为 ω 的余弦函数模型:

$$g(\omega) = F(\omega) \cdot \cos(\omega t) = \sqrt{160 / \left(\frac{2\pi}{\omega} + \frac{\omega}{2\pi} \right)} \cdot \cos(\omega t), \quad (5)$$

将不同 ω 下的 $g(\omega)$ 进行循环叠加

$$\varphi(\omega) = \sum g(\omega), \quad (6)$$

式中 $\varphi(\omega)$ 即为时域谱下振动信号的幅值,最后将不同时间下的 $\varphi(\omega)$ 输出,至此完成了信号产生单元的编

程,其流程图如图 2 所示。

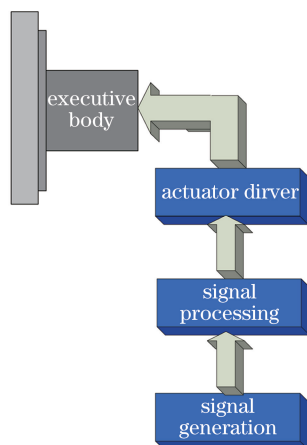


图 1 卫星振动模拟源系统

Fig. 1 System of satellite vibration analog source

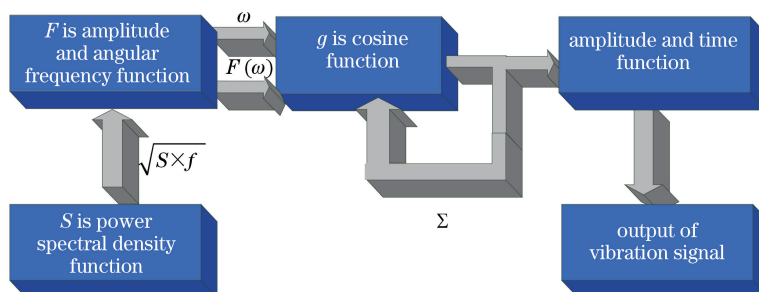


图 2 振动信号的产生流程图

Fig. 2 Flow chart of vibration signals formed

图 3 是编写的上位机控制界面,主要由 A、B、C 三个部分组成,其中 A 是板卡选择部分,负责切换不同种类模拟源信号,如“选卡 1”为标准正弦信号输出、“选卡 2”为高斯噪声输出、“选卡振动谱”为模拟的 SILEX 平台振动输出,“选卡 1”与“选卡 2”是模拟源备用调试选项;B 是系统监测部分,负责观察信号输出状态,其中监

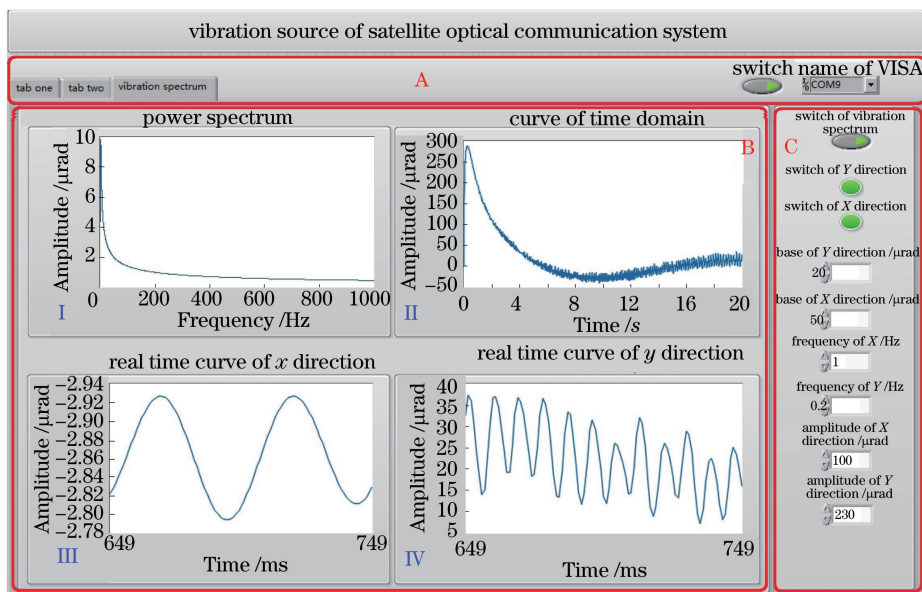


图 3 控制界面

Fig. 3 Control interface

测框(I)和(II)反映模拟源振动的功率谱曲线和时域曲线,监测框(III)和(IV)反映模拟源方位和俯仰实时振动曲线,若在监测框(III)和(IV)中发现振动异常,应立即停止;C是参数调整部分,负责设定方位和俯仰方向的振幅、频率以及偏置,使其与标定后的系统匹配,同时兼有方位和俯仰方向启停功能,方便初期一维方向调试使用。

本系统的信号处理模块采用以 STM32F4 为核心的控制单元,接收上位机模拟视轴振动的数据,以数/模(D/A)转换的形式驱动执行机构作俯仰和方位摆动,其中 D/A 中采用分辨率为 16 bit、响应时间约为 $10\ \mu\text{s}$ 的芯片模拟高频微小振动。

由信号处理模块产生的模拟振动功率谱控制电压作用于执行机构驱动器,控制执行机构,实现视轴的随动变化。选用德国 E-P04 系列的振镜作为执行机构,振镜具有俯仰和方位两个摆动方向,执行精度优于 $10\ \mu\text{rad}$,伺服带宽远大于功率谱模拟带宽,同时偏转范围为 $\pm 10\ \text{mrad}$,满足卫星模拟的偏转范围;输入驱动电压范围为 $\pm 10\ \text{V}$,满足信号处理模块输出电压范围。

4 卫星振动模拟源性能测试与实验结果

4.1 测试环境搭建

为验证设计的卫星振动模拟源系统性能,搭建实物环境进行实时模拟,如图 4 所示,光源选用波长为 808 nm 的半导体激光器,其出射光束的束散角小于 $6\ \text{mrad}$,最大输出功率为 7000 mW 且连续可调,经扩束单元、视场光阑入射到振镜有效面积上进行反射,用振镜抖动模拟卫星振动。利用平行光管进行扩束,压缩输出光束束散角,模拟无穷远的平行光束。由于该系统为粗精复合系统,电荷耦合式(CCD)相机采用开窗口模式,在小窗口模式下有很好的角分辨率,能够对高频、微小振动进行检测,卫星振动功率谱的幅值小于 $300\ \mu\text{rad}$,故可以达到较好的检测效果。

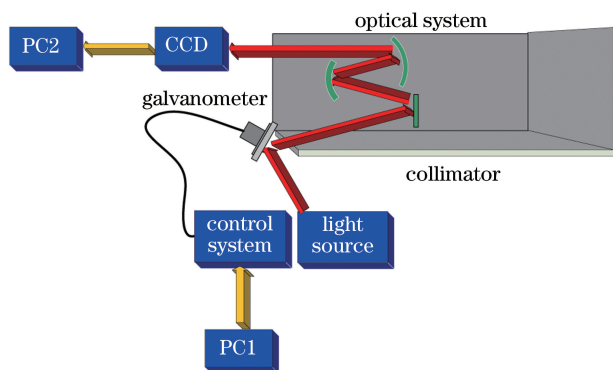


图 4 实验环境示意图

Fig. 4 Schematic of experimental environment

电控部分 PC1 借助软件编程对标准振动功率谱密度函数进行处理,将解析出的时域信号传递给控制系统实时控制振镜摆动。此时从光源发出的光束经振镜反射进入平行光管后平行出射,打到探测器 CCD 相机上对光斑脱靶量进行闭环检测,借助 PC2 实时记录检测数据,并通过软件编程对光斑脱靶量进行分析。比较 PC2 处实际振动功率谱和 PC1 处模拟振动功率谱相似度,即可评价振动模拟源系统的性能。

4.2 软件平台测试

PC1 与控制系统采用 RS232 进行通信,每隔 20 ms 发送一帧数据,下位机将接收到的数据进行平滑处理。图 5 是在 PC1 上应用 LabVIEW 模拟出 SILEX 的标准振动功率谱密度函数,可以发现振动幅值较大的发生在低频区,之后幅值随着频率的增加而减小,当频率等于 100 Hz 时,振动幅值几乎可以忽略不计,即该振动频谱集中在 100 Hz 以内,此时对光通信链路影响较大。

为方便得到幅值与频率的函数,将图 5 按(2)式变换得到图 6,分析可知卫星运动兼有高频和低频两种运行状态,在频率较低时,作大范围的振动,模拟外界环境影响;在频率较高时,作小范围的扰动,模拟星上高速运动旋转部件,如飞轮、陀螺等的影响。

图 7 是将图 6 拆解成许多不同幅值、不同频率的余弦波叠加后的时域曲线,观察发现初始时刻有一个极

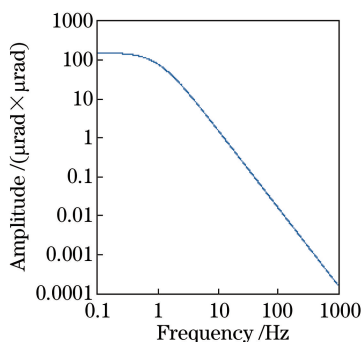


图 5 模拟出的 SILEX 平台振动功率谱
Fig. 5 Simulated results of vibration power spectrum of SILEX platform

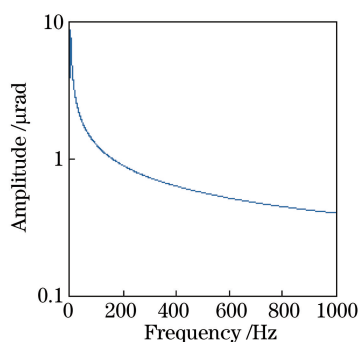


图 6 幅值与频率的函数
Fig. 6 Function of amplitude and frequency

大值的跳变,此值是由软件解析引入的,SILEX 标准输出起振在最大值处,而上位机控制执行机构初始状态需从 $0 \mu\text{rad}$ 开始,故会出现一个瞬间的极值,之后函数包络曲线从 $280 \mu\text{rad}$ 趋于 $0 \mu\text{rad}$,同时伴有小幅高频的扰动。

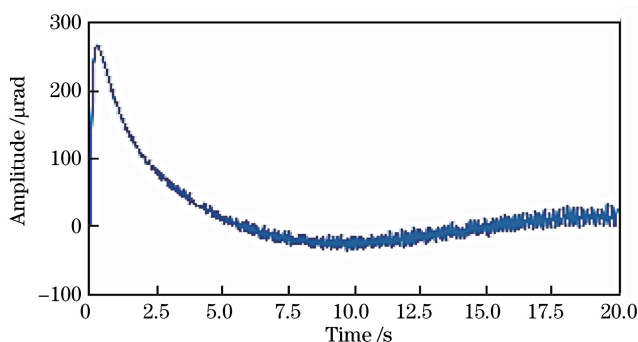


图 7 SILEX 平台振动的时域曲线
Fig. 7 Time domain curve of SILEX platform vibration

图 8 是经过平行光管及透镜组在 PC2 上显示、由 CCD 相机探测到的脱靶量曲线,在仅有模拟源扰动的情况下,该脱靶量信息能反映模拟源振动的时域状态。与图 7 相比,在一个周期内,脱靶量曲线的幅值略低于平台振动曲线的幅值,同时会削弱部分信号,这是由光束在透镜系统中折射和反射产生的延迟及执行机构精度引起的,若要评定该模拟源系统振动幅值的模拟精度,只需取幅值差的 3 倍标准差即可。仅从整个周期的包络曲线来看,接收端的振动信号与发射端模拟的模型在时域具有很好的相似度。

为了更好地说明振动源的模拟效果,需要在频域上对脱靶量曲线与模拟曲线作进一步比较,将图 8 中的数据进行傅里叶变换后得到脱靶量频谱,如图 9 所示。

观察图 9 可以发现,在某些频率下幅值为 $0 \mu\text{rad}$,这是由于实验中只能取到有限个点,故不能得到频谱

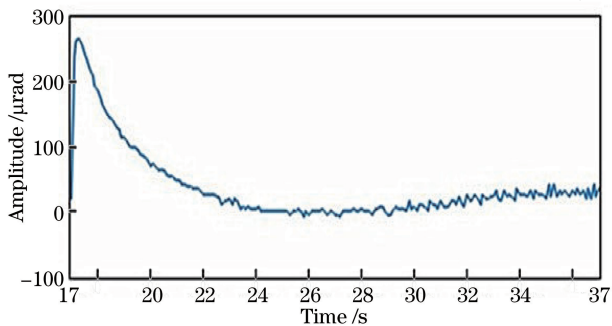


图 8 脱靶量曲线
Fig. 8 Miss distance curve

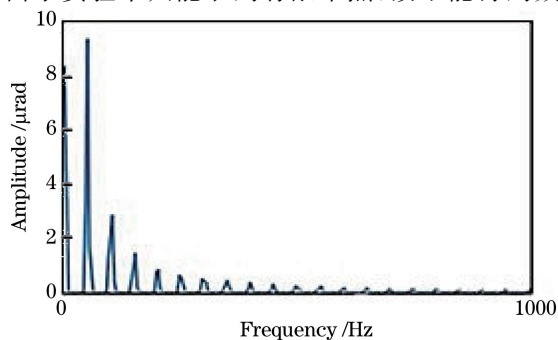


图 9 实验数据的频域曲线
Fig. 9 Frequency domain curve of experimental data

中所有频率下的幅值。若能取到足够多的点,将会得到图 9 中峰值组成的包络曲线,此包络线能反映 PC2 接收的脱靶量频域特性,与图 6 对比,可以发现脱靶量频谱与模拟曲线的频谱仍有很好的相似性,这就说明设计的卫星光通信振动源工作正常,且正以 SILEX 功率谱曲线进行振动。另外,借助 LabVIEW 的数据处理能力取到尽可能多的不同频率下的点,可以使模拟结果更加准确。

4.3 伪随机信号的处理

APT 系统完成粗、精跟踪后,精跟踪精度一般达到几微弧度,若此时振动源引入额外的极大跳变值,将不能准确、真实地反映精跟踪精度。本次设计的卫星平台振动方案是由功率谱密度函数解析而来,如图 7 所示,初始时刻,幅值从 $0 \mu\text{rad}$ 跳变到 $280 \mu\text{rad}$,该瞬间极大增益不利于 APT 系统性能评测。另外,该种方案只能在一个周期内产生伪随机振动谱,而精跟踪精度测试时往往需要几个周期,在实际应用中,需要对伪随机信号进行一定的处理。

首先,振动源初始时刻引入的极大跳变值是由软件解析产生的,故截取有效函数段,使其从最大幅值处起振。然后,模拟源以固定的周期形式作往复运动,即在两个周期衔接处,仍会出现一个极大的跳变值,如图 10 中的时间 20 s 位置处,所以需进一步将函数进行翻转,得到的翻转函数与现有函数拼接在一起。

处理后的时域曲线如图 11 所示。

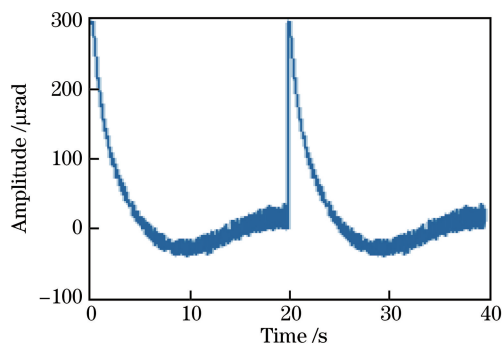


图 10 两个周期内振动的时域曲线

Fig. 10 Time domain curve of vibration in two cycles

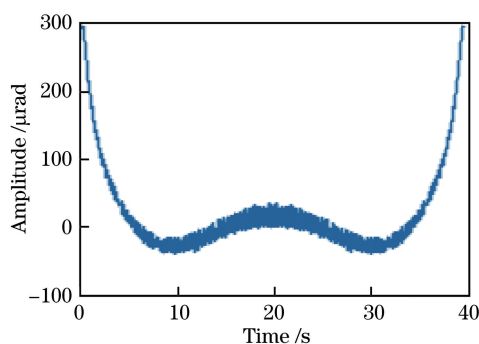


图 11 处理后的时域曲线

Fig. 11 Time-domain curve after treatment

观察图 11 与图 7 可发现,处理后的曲线消除了初始信号的极大跳变值,同时与图 10 对比可知,拼接后产生的新信号实现了相邻周期间的平滑过渡,这样处理的优势在于既保持了模拟源低频振动和高频扰动的特性,也避免引入极值影响 APT 精跟踪精度的评定。在空间激光通信捕获、跟踪测试中,需要在连续周期内采集粗、精跟踪精度,应用此种方法对模拟源产生的伪随机信号进行处理,避免了多个周期间不稳定的跳动,为实际测试提供了条件。

4.4 实验结果

为评定该系统幅值模拟精度,首先使振动源系统按伪随机信号处理后的时域曲线运行,然后取图 11 中 0~20 s 内不同时刻发射端模拟幅值,与 PC2 接收端对应时刻的脱靶量幅值作差,得到的结果如图 12 所示,最大振动幅值差发生在高频振动区间,约为 $1.7 \mu\text{rad}$ 。最后将图 12 中的结果取 3 倍标准差,约为 $1.988 \mu\text{rad}$,即实际应用中该系统幅值模拟精度优于 $2 \mu\text{rad}$,为 APT 性能测试提供了真实有效的条件。

5 结 论

为了模拟实际在轨卫星的角振动状态,设计了卫星振动模拟源系统。该系统由上位机、控制板和振镜组成。上位机模拟振动信号的产生,借助 LabVIEW 解析标准振动功率谱密度函数,并推导验证了此方法的可行性;控制板是基于 STM32F4 为核心的控制系统,负责对信号进行处理,控制驱动器;振镜是执行机构,负责将接收的信号转换成俯仰和方位摆动,模拟卫星振动状态。同时搭建实验平台测试模拟源性能,通过将探测器接收的脱靶量信息进行傅里叶变换,得到功率谱曲线,与模拟端的功率谱曲线进行比较,验证了此模拟源系统真实可用。为了使其可以应用在实际测试环境中,又对产生的伪随机信号进行了处理,实验结果表明:振动幅值模拟精度优于 $2 \mu\text{rad}$,模拟的角振动结果达到预期要求。此外,由于其频率易调节,模拟幅度可

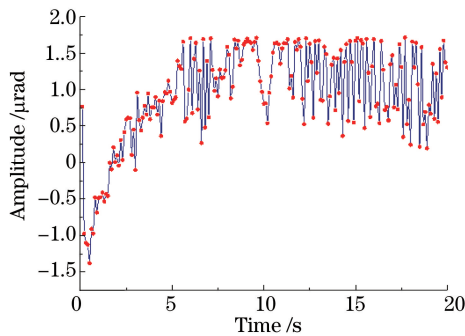


图 12 振动幅值差曲线

Fig. 12 Curve of vibration amplitude difference

达 ± 10 mrad,故该系统还易选取不同的振动模型。设计的卫星振动模拟源系统,可在空间激光通信的捕获、跟踪性能测试中,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong, *et al.* The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 198-246.
姜会林, 佟首峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 198-246.
- Hu Zhen, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.* Research on ATP system technology of laser communication terminal in space[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(6): 752-757.
胡 贞, 姜会林, 佟首峰, 等. 空间激光通信终端 ATP 技术与系统研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 752-757.
- Ho T, Milner S D, Davis C C. Fully optical real-time pointing, acquisition and tracking system for free space optical link [C]. SPIE, 2005, 5712: 81-92.
- Petro N E, Keller J W. Five years at the moon with the lunar reconnaissance orbiter (LRO): new views of the lunar surface and environment[C]. Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group, 2014: 3059.
- Cui Ning, Chen Xinglin, Cao Kairui, *et al.* Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1394-1400.
崔 宁, 陈兴林, 曹开锐, 等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5): 1394-1400.
- Ma Jing, Han Qiqi, Yu Siyuan, *et al.* The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 228-232.
马 晶, 韩琦琦, 于思源, 等. 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 228-232.
- Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Liu Yunqing, *et al.* Study on platform vibration simulation experimental system for free space laser communication system[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(8): 1001-1003.
佟首峰, 姜会林, 刘云清, 等. 自由空间激光通信平台振动模拟实验系统研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 1001-1003.
- Wang Ningqiang, Liu Xiangdong, Chen Zhen, *et al.* A semi-physical real-time simulation platform for satellite attitude control system based on MATLAB[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1617-1620.
王宁强, 刘向东, 陈 振, 等. 基于 MATLAB 的卫星姿态控制半物理实时仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1617-1620.
- Chen Chunyi, Yang Huamin, Tong Shoufeng, *et al.* Real-time simulation of satellite-platform vibration of space optical communication[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16): 3834-3837.
陈纯毅, 杨华民, 佟首峰, 等. 空间光通信卫星平台振动实时模拟[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3834-3837.
- Guo Yongfu, Wang Humei. Survey on SILEX and subsequent development of space laser communication in Europe[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(2): 88-93.
郭永富, 王虎妹. 欧洲 SILEX 计划及后续空间激光通信技术发展[J]. 航天器工程, 2013, 22(2): 88-93.