

文章编号: 1003-501X(2010)10-0011-05

卫星激光通信随机振动补偿模拟实验研究

许博谦, 王 刚

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 卫星平台随机振动对星间激光链路通信质量产生增大误码率等不良影响。为了有效地补偿随机振动, 提高通信质量, 本文设计并搭建了一套用于模拟卫星平台振动与补偿的实验系统。该系统通过面阵 CCD 探测光束偏转角度, 采用压电陶瓷致动的快速偏转镜模拟、补偿卫星平台的随机振动。针对随机振动补偿实验的特殊性, 文中定义了补偿效率因子 η_R 以描述补偿效果。实验结果表明, 该系统对卫星平台振动中的低频分量具有一定的补偿能力, 当 CCD 采样频率高于振动频率三倍以上时, 该系统对低频随机振动的补偿效果显著。

关键词: 光通信; 随机振动; 卫星平台; 星间激光通信

中图分类号: TN929.13

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.10.003

Experimental Research on Satellite Random Vibration Compensation for Intersatellite Laser Communication

XU Bo-qian, WANG Gang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The negative effect of satellite vibration on the intersatellite laser communication was presented, including the increase of bit error rate. To solve the problem of random vibration compensating, a testbed was designed and assembled, which detects the deflection angle caused by vibration with a high frame frequency area charge coupled device. The testbed simulates and compensates vibration with fast steering mirrors actuated by piezoelectric actuators. As there is difference between sine wave vibration and random vibration, the compensation efficiency factor η_R is defined to evaluate effectiveness of random vibration compensation. The experiment result shows when the sample rate of CCD is three times of that of vibration frequency, the compensation efficiency is remarkable, and the compensation of the testbed is effective.

Key words: optical communication; random vibration; satellite; intersatellite laser communication

0 引 言

卫星光通信与微波通信相比具有通信容量大、终端体积小和保密性好等特点, 是未来卫星通信技术的一个很有潜力的发展方向。随着卫星光通信技术研究的不断深入, 卫星平台随机振动的影响得到广泛的重视。有研究表明, 随机振动会增大光通信的误码率^[1-2], 影响通信质量。

为抵偿卫星平台微振动造成的影响, 振动补偿技术的研究显得尤为重要。有研究者经过深入调研后指出, 导致卫星平台振动的原因繁多, 机理复杂, 但是对光通信影响较大的主要是频率低于 100 Hz、振幅 100 μrad 以内的振动^[3]。为抵消振动给通信终端带来的种种不良影响, 有研究者提出了采用面阵 CCD 作为探测器件测量振动, 采用快速偏转镜作为执行器件的振动补偿方案, 实验取得了显著的效果^[3-4]。

但是, 在以往的研究工作中, 将卫星平台的振动简化为正弦振动进行理论分析和实验研究, 还不能真实地模拟星上复杂的振动环境, 也不能充分地检验振动补偿系统的性能。本文采用国外实测卫星平台的振

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-07-06

作者简介: 许博谦(1985-), 男(汉族), 黑龙江大庆人。研究实习员, 硕士, 主要研究卫星振动主动补偿及精密稳像控制。

E-mail: ciomp_xubq@126.com。

动数据模拟星上随机振动,并根据随机振动的特点定义了补偿效率因子 η_R 以描述补偿效果。搭建平台并开展了验证实验,取得了良好的效果。

1 卫星平台随机振动仿真

最早的星上在轨振动测试在 1984 年由美国的 NASA 对 Landsat-4 测试完成^[5],这是人们首次通过实验测得卫星在轨时的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)曲线。1990 年,ESA 对半导体激光星间通信实验卫星(Emiconductor Intersatellite Laser Experiment, SILEX)进行了在轨微振动测试实验^[6],并模拟了一条可以模拟该卫星平台微振动的功率谱密度曲线。

$$S(f) = \frac{160 \mu\text{rad}^2/\text{Hz}}{1 + (f/1 \text{ Hz})} \quad (1)$$

上述两条曲线有很多共同点,如微振动的振幅随着频率的增加而减小,这使得对光通信影响较大的振动主要集中在低频。

有研究者根据上述两次实验测得的功率谱,设计了相应的滤波器,采用对高斯白噪声进行滤波的方法,将频域的功率谱密度转化为时域信号,并以此作为模拟卫星平台微振动的控制信号^[7]。该方法得到的信号可以更加真实、有效地模拟星上随机振动,本文中采用该方法模拟卫星平台上的随机振动。SILEX 平台的模拟振动信号如图 1(a)所示,其功率谱估计与 ESA 实测功率谱的对比如图 1(b)所示,证明该信号能够模拟 SILEX 平台的振动。图 1(a)中看似连续的振动信号实际由多个离散的点连接而成,点间的时间间隔为 0.10 s,这组信号可以模拟频率在 10 Hz 以内的随机振动。实验中制作了多组不同频率的振动信号以研究补偿系统的性能。

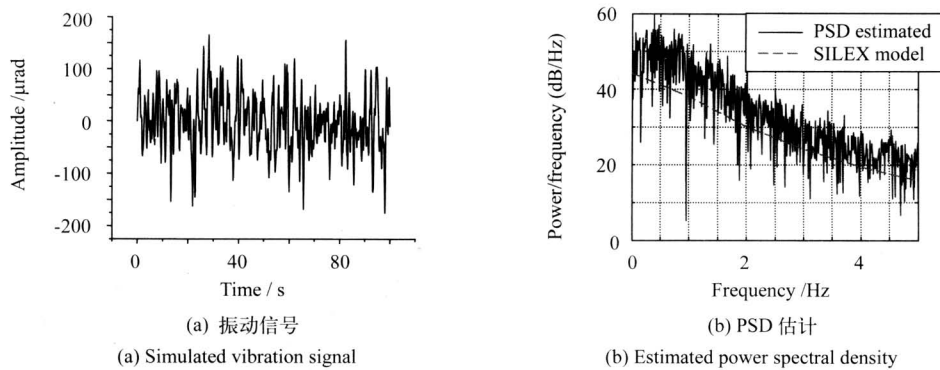


图 1 模拟的 SILEX 平台振动信号及其 PSD 估计

Fig.1 SILEX platform vibration signal simulation and estimated power spectral density

2 随机振动补偿原理

补偿系统的控制信号流图如图 2 所示,图中 $G_{\text{Driver}}(s)$ 、 $G_{\text{PZT}}(s)$ 、 $G_{\text{Angle}}(s)$ 、 $H_{\text{FeedBack}}(s)$ 等参数代表和快速偏转镜相关的传递函数, $G_{\text{Detect}}(s)$ 是探测环节的传递函数, $G_{\text{Comp}}(s)$ 是补偿环节传递函数, $U(t)$ 、 $\alpha(t)$ 分别是系统的输入与输出, $\theta(t)$ 是外界扰动,即卫星平台的微振动。

图中与快速偏转镜闭环控制环节的传递函数:

$$G_{\text{FSM}}(s) = G_{\text{Driver}}(s) \frac{G_{\text{PZT}}(s)}{1 + G_{\text{PZT}}(s) \cdot H_{\text{FeedBack}}(s)} G_{\text{Angle}}(s) \quad (2)$$

整个系统的传递关系:

$$\theta - (U - \theta \cdot G_{\text{Detect}} \cdot G_{\text{Comp}}) \cdot G_{\text{FSM}} = \alpha \quad (3)$$

本实验中为简化起见,将输入 U 置零,则在理想情况下,振动完全得到补偿,则输出 α 也应为零,则补偿环节的传递函数:

$$G_{\text{Comp}}(s) = -\frac{1}{G_{\text{FSM}}(s) \cdot G_{\text{Detect}}(s)} \quad (4)$$

其中快速偏转镜的传递函数可以通过实验测量^[8-9], CCD 探测振动的传递函数则需通过实验标定测得。

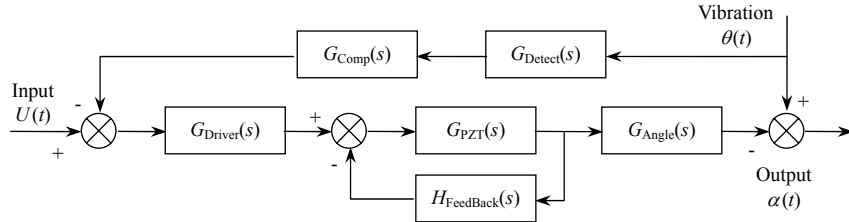


图 2 补偿系统控制信号流图

Fig.2 Control signal flow graph of compensation system

3 模拟实验结果及分析

在搭建模拟实验平台的过程中, 选用快速偏转镜(Fast Steering Mirror, FSM)作为模拟卫星平台振动、补偿振动的器件, 该器件采用压电陶瓷驱动, 精度可达 μrad 量级, 响应频率接近 1 kHz^[10], 被广泛应用于自适应光学等领域^[11]。目前, 面阵 CCD 已被用于动态目标跟踪^[12-13], 本实验平台采用高帧频面阵 CCD 探测振动, 其最高帧频可达 200 Hz 以上, 能够探测低频振动。

振动补偿模拟实验平台的原理框图如图 3 所示, 实验装置实物图如图 4 所示, 由计算机 1 控制快速偏转镜 FSM1 模拟卫星平台微振动引起的光束抖动, CCD 通过探测光斑的位置移动, 实时将角度数据传输至计算机 2 计算振动引起的光束偏角, 并控制快速偏转镜 FSM2 补偿振动引起的光束抖动。

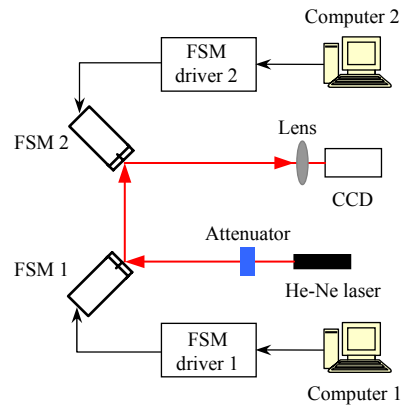


图 3 实验原理框图

Fig.3 Experiment principle

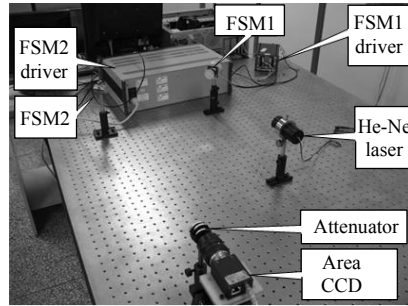
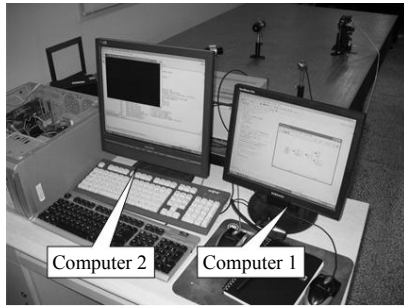


图 4 实验装置实物图

Fig.4 Experiment facility

以往的振动补偿仿真实验中, 定义振动补偿因子 η 评价补偿效果^[3]:

$$\eta = 1 - \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\max}} \quad (5)$$

振动补偿因子可以有效地评价补偿系统对正弦振动的补偿效果, 但是对于随机振动补偿效率的评价则显得不够客观。考虑到随机振动的特点, 补偿效率评价应从统计的角度出发, 并能够体现补偿系统所抵消的振动能量, 本文提出采用随机振动补偿效率因子 η_R 作为评价手段。

$$\eta_R = \left(1 - \frac{\sum_i C_i^2}{\sum_i A_i^2}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: C_i 、 A_i 分别为补偿前后的光斑偏移量。

当 $\sum_i C_i^2 = 0$ 时, 补偿效率 $\eta_R = 100\%$, 振动完全被补偿, 光斑位置保持在平衡位置固定不动。这是一种理想情况, 对于随机振动, 不可能做到完全补偿;

当 $\sum_i C_i^2 = \sum_i A_i^2$ 时, 补偿效率 $\eta_R = 0\%$, 表明补偿系统对所探测到的振动信号无动于衷, 振动没有得到任何补偿;

当 $\sum_i C_i^2 > \sum_i A_i^2$ 时, 补偿效率 $\eta_R < 0\%$, 表明补偿系统虽然探测到了振动信号, 但是做出了不恰当的补偿, 不但没有补偿原有振动的影响, 反而推波助澜, 恶化了不良影响。这是在构建补偿系统时最不希望看到的结果。

随机振动补偿实验的结果如图 5 所示, FSM1 模拟 SILEX 平台上的随机振动, 将 CCD 的采样频率设置为 100 Hz, 理论上该系统能补偿 50 Hz 以内的振动。图中可见, 随着振动频率的增加, 补偿效率呈下降趋势。当 CCD 采样频率高于振动频率三倍以上时, 补偿效率高于 50%, 效果较好。而当 CCD 采样频率仅为振动频率二倍至三倍时, 补偿效果不够理想。可见, 提高探测器件的采样频率, 可以有效地提高补偿效率, 增大补偿带宽。

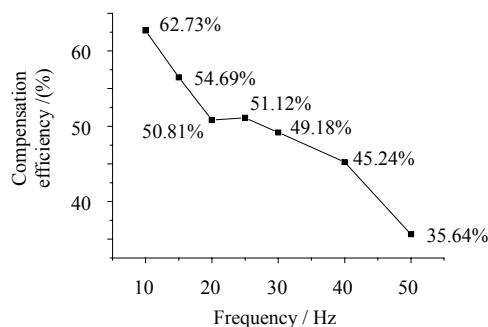


图 5 随机振动补偿实验结果

Fig.5 Experiment result of random vibration compensation

4 结 论

卫星平台的随机振动是影响星间链路通信质量的重要因素, 有必要构建振动补偿系统。补偿系统补偿的对象是卫星平台振动中的低频分量。针对随机振动补偿的特殊性, 应采用补偿效率因子 η_R 描述补偿效果。实验结果表明, 当探测器的采样频率高于振动频率三倍时, 补偿系统能够取得较好的效果。下一步可通过提高探测器件采样频率来提高补偿效率。

致谢: 衷心地感谢我的硕士导师马晶教授和谭立英教授, 在课题研究和本文撰写过程中, 得到了两位老师悉心的指导和无私的帮助, 在此对两位老师表达最诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] 谭庆贵, 胡渝, 赵悦莹. 卫星振动对星间光码分多址系统性能的影响[J]. 光子学报, 2006, **35**(11): 1730-1733.
TAN Qing-gui, HU Yu, ZHAO Yue-ying. Influence of Satellite Vibration on the Performance of Inter-Satellite Optical CDMA Communication System [J]. *Acla Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1730-1733.
- [2] 李勇军, 赵尚弘, 胥杰, 等. 瑞利振动下空间光通信误码率研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, **7**(5): 48-50.
LI Yong-jun, ZHAO Shang-hong, XU Jie, *et al.* Research on BER of Laser Satellite Communication System under Rayleigh Vibration [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2006, **7**(5): 48-50.
- [3] 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.
MA Jing, HAN Qi-qi, YU Si-yuan, *et al.* The Effect of Vibration on Intersatellite Optical Communication and the Resolving Project [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 228-232.
- [4] 于思源, 谭立英, 马晶, 等. 激光星间链路中振动补偿技术研究[J]. 光电子·激光, 2004, **15**(4): 472-476.
YU Si-yuan, TAN Li-ying, MA Jing, *et al.* Study of Vibration Compensation Technology in Intersatellite Laser Links [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(4): 472-476.

- [5] Sudey J, Sculman J R. In orbit measurements of landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances [C]// **35th Congress of the International Astronautical Federation**, Lausanne, Switz, 1984: IAF-84-117.
- [6] Wittig M, van Holtz L, Tunbridge D E L. In-Orbit Measurements of Microaccelerations of ESA's Communication Satellite OLYMPUS [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 1990, **1218**: 205-214.
- [7] 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.
CHEN Chun-yi, YANG Hua-min, TONG Shou-feng, *et al.* Real-time Simulation of Satellite-platform Vibration of Space Optical Communication [J]. **Journal of System Simulation**, 2007, **19**(16): 3834-3837.
- [8] 郑彬, 凌宁. 高速倾斜镜的频率响应函数测量[J]. 光电工程, 1999, **26**(5): 58-62.
ZHENG Bin, LING Ning. Measurement for Frequency Response Function of a Fast-Steering Mirror [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 1999, **26**(5): 58-62.
- [9] 李新阳, 凌宁, 陈东红, 等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(1): 31-36.
LI Xin-yang, LING Ning, CHEN Dong-hong, *et al.* Stable Control of the Fast Steering Mirror in Adaptive Optics System[J]. **High Power Laser and Particle Beams**, 1999, **11**(1): 31-36.
- [10] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(1): 43-47.
SHAO Bing, SUN Li-ning, QU Dong-sheng, *et al.* QIN Chang. Design of Fine Pointing tip/tilt Mirror of ATP System for Free Space Optical Communication [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2006, **14**(1): 43-47.
- [11] 于立民, 代作晓, 王模昌, 等. 相位检测法定镜自适应校正技术[J]. 光学 精密工程, 2003, **11**(5): 448-452.
YU Li-min, DAI Zuo-xiao, WANG Mo-chang, *et al.* Adaptive Alignment of Fixed Mirror by Phase Detection [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2003, **11**(5): 448-452.
- [12] 李国宁, 刘妍妍, 金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统[J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(3): 558-564.
LI Guo-ning, LIU Yan-yan, JIN Long-xu. Area CCD Imaging System Used in Moving Target Tracking [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(3): 558-564.
- [13] 于前洋. 作为图像传感器的 CCD、ICCD 和 IRCCD [J]. 光学 精密工程, 1994(5): 8-16.
YU Qian-yang. The CCD, ICCD and IRCCD as Imager [J]. **Optics and Precision Engineering**, 1994(5): 8-16.